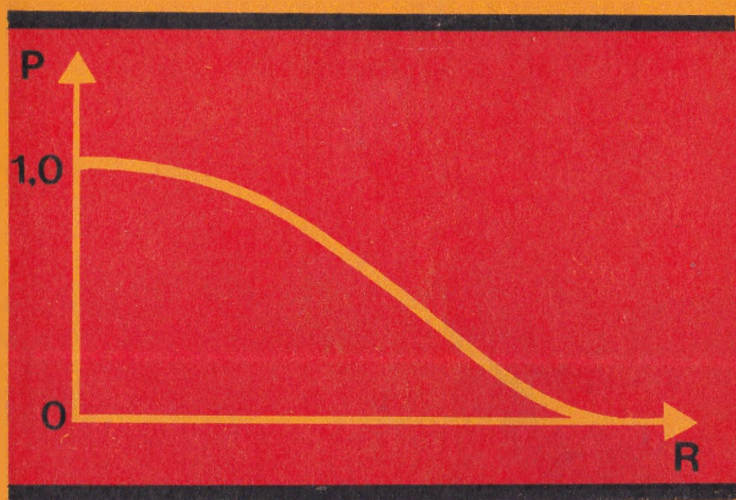


42.2.3.5.7
Т-68

В.А.Горбунов

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ



В. А. ГОРБУНОВ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ

Инв. №	18585
Войск. часть	31650

Ордена Трудового Красного Знамени
ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СССР
МОСКВА — 1980

ББК 68.517

Г67

УДК 623.46.004.15

Горбунов В. А.

Г67 Эффективность обнаружения целей.— М.: Воениздат, 1979.— 160 с., ил.

В пер. 60 к.

В книге дана классификация систем наблюдения по различным признакам, рассматриваются методы оценки эффективности радиотехнических средств наблюдения как источников информации для современных автоматизированных систем управления.

Рассмотрены принципы рационального размещения средств поиска и обнаружения, методы расчета и оценки эффективности простых и многоэлементных систем наблюдения.

Описание иллюстрировано примерами по оценке эффективности обнаружения целей.

Книга написана по материалам зарубежной печати. Она рассчитана на военных специалистов, эксплуатирующих средства наблюдения, и на читателей, интересующихся проблемами поиска и обнаружения целей.

Г 11204 — 263
068(02)—79 80.79.1304040000.

ББК 68.517

355.726

© Воениздат, 1979

Валерий Александрович Горбунов
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ

Редактор В. А. Данилов
Технический редактор Е. Н. Слепцова
Корректор Л. А. Сафошкина
ИБ № 477

Сдано в набор 29.09.78. Подписано в печать 20.08.79.
Г-22838. Формат 84 × 108/32. Бумага тип. № 2. Печать высокая.
Гарн. литературная. Печ. л. 5. Усл. печ. л. 8,40. Уч.-изд. л. 8,372.
Тираж 12 000 экз. Изд. № 13/2981. Зак. 19. Цена 60 к.

Воениздат
103160, Москва К-160
Московская типография № 13 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
107005, Москва, Б-б, Денисовский пер., д. 30.

ВВЕДЕНИЕ

В комплексе проблем обеспечения обороноспособности от внезапного нападения одно из ведущих мест занимают проблемы своевременного обнаружения сил и средств нападения, определения их характера, местоположения и параметров движения в интересах обеспечения своевременного ввода в действие и эффективного использования сил и средств борьбы с ними.

По мнению зарубежных специалистов, указанные проблемы в современных условиях решаются за счет создания на возможных театрах военных действий, в их районах и зонах соответствующих эффективно действующих локальных и глобальных систем наблюдения и освещения обстановки, призванных осуществлять своевременное обнаружение и распознавание, определение координат и элементов движения целей, контроль за их местоположением, движением и действием. Рациональное построение и эффективное функционирование разнообразных локальных и глобальных систем наблюдения, контроля и освещения может обеспечить качественное знание обстановки в пространстве и во времени, а также своевременное развертывание и применение стратегических и оперативных сил и средств противодействия и защиты. Аналогично эффективное функционирование тактических и специальных средств поиска, обнаружения и целеуказания может обеспечить своевременное приведение в готовность боевых единиц и их успешное применение.

Повышение эффективности обнаружения целей имеет большое значение как в тактическом, так и в оперативном и стратегическом масштабах. Этому может содействовать не только твердое знание личным составом характеристик объектов обнаружения и тактико-технических возможностей средств поиска и обнаружения, но и умение решать задачи рационального построения и использования систем наблюдения и оценки эффективности

обнаружения целей средствами и системами наблюдения в различных ситуациях.

За последние годы у нас и за рубежом появился ряд публикаций по вопросам теории и практики поиска и обнаружения объектов. Изучение и обобщение этих публикаций имеет большое значение для разработки и совершенствования методологии оценки эффективности обнаружения воздушных, наземных и морских объектов соответствующими средствами и системами наблюдения.

Рассмотрение многих публикаций [4, 6, 8, 14, 17, 24, 28, 29, 31, 34, 38, 40—43, 45, 53, 55, 57, 60, 61] показывает, что применяемые для различных видов обороны системы наблюдения и освещения обстановки все более приобретают комплексный и взаимосвязанный характер. Взаимное дополнение и взаимное информационное обеспечение, использование некоторых единых принципов построения и расчета систем и их элементов, применение достаточно общих и универсальных методик оценки их эффективности — характерные направления развития указанных систем. При этом для каждой из них характерно широкое использование разнообразных видов стационарных и маневренных средств наблюдения, соответственно устанавливаемых на различных неподвижных и подвижных носителях (наземных и береговых постах, надводных кораблях).

Широкое применение различных технических средств наблюдения в качестве средств поиска и обнаружения целей, управления и наведения объектов на цели требует все большего внедрения количественных методов для оценки эффективности этих средств.

В книге предпринята попытка обосновать некоторые принципы классификации и методы построения и расчета простейших систем наблюдения, применяемых для поиска и обнаружения целей на рубежах и в районах возможных действий, и определить общие методологические основы оценки эффективности обнаружения целей стационарными и подвижными системами.

При оценке эффективности средств и систем наблюдения в книге использованы методы теории вероятностей, общие теоретические предпосылки и специальные методы теории поиска и обнаружения целей.

Глава 1

ОБЩИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ. КРИТЕРИИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ

Под эффективностью обнаружения целей понимается выраженная количественно успешность решения задач поиска и обнаружения целей средствами и системами наблюдения.

При этом используется общий методологический подход, основанный на разделении процесса обнаружения на два этапа:

- установление тактического контакта, связанного с вхождением цели в зону действия средств наблюдения;
- установление приборного контакта, связанного с обнаружением цели в зоне действия средств наблюдения.

Такой подход позволяет относительно просто и достаточно точно учитывать последовательное влияние на эффективность обнаружения целей тактических и технических факторов, характера движения объектов поиска и физических условий, определяющих наблюдаемость целей. Он дает возможность в определенной мере синтезировать и использовать все ранее разработанные подходы, методы и модели оценки эффективности обнаружения целей.

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Дадим определение некоторым терминам, применяемым при решении задач поиска и обнаружения целей.

Прибором (средством) наблюдения называется всякое простое или сложное устройство (начиная от бинокля и кончая сложным радиолокационным, гидроакустическим или другим радиотехническим комплексом), которое применяется для наблюдения за обстановкой в той или иной физической среде, для обнаружения в ней объектов поиска (целей) и определения данных о них.

Под системой наблюдения понимается совокупность однородных или разнородных средств наблюдения, связанных функционально единством решаемых задач поиска, обнаружения и наблюдения целей, характеризующаяся той или иной общей структурой построения и взаимного расположения составляющих ее средств наблюдения.

Целью называется объект поиска и обнаружения, т. е. тот объект (наземный, морской, воздушный), который должен быть найден и обнаружен в процессе наблюдения (поиска) в пространстве.

Наблюдателем называется как отдельное средство (прибор) наблюдения, включая и его носитель, так и их совокупность, образующая систему стационарных или подвижных средств, используемых для поиска и обнаружения целей, с соответствующими средствами управления, обработки и передачи информации, а также с обслуживающим персоналом.

Поиск — целенаправленное действие наблюдателя, состоящее в обследовании пространства, где возможно присутствие или появление объекта поиска, и имеющее своей конечной целью его обнаружение.

При обследовании пространства поиска широко применяются различные способы обзора (круговой, секторный и др.) и передвижение (маневрирование) носителей средств наблюдения в целях переноса зон их действия.

Основной задачей поиска как специфического действия является обнаружение, т. е. установление факта присутствия цели в обследуемом пространстве с определением ее характера и местоположения.

Таким образом, обнаружение как следствие поиска — событие, состоящее прежде всего в установлении факта присутствия цели в зоне поиска в результате получения контакта с целью с последующим определением данных, характеризующих цель.

Обнаружение цели может затем перерасти в слежение за целью, осуществляемое той же системой, которая обнаружила цель, либо другой системой после приема ею целеуказания от системы обнаружения.

Слежение (сопровождение) — это непрерывное или периодическое наблюдение цели, осуществляемое той или иной системой наблюдения и заключающееся в контроле значений текущих координат цели и параметров ее движения.

Освещение обстановки о цели — это создание на основе сбора, обработки и обобщения данных о цели, получен-

ных в процессе ее обнаружения и слежения за ней, наглядного представления информации о факте обнаружения, характере, местоположении и движении цели.

Обнаружение, слежение и освещение обстановки представляют собой три характерные функции системы наблюдения (как информационной подсистемы всякой системы управления). Все рассматриваемые в данной книге вопросы эффективности относятся только к первой из указанных выше функций информационной подсистемы системы управления. В связи с этим основным предметом всего последующего рассмотрения являются лишь вопросы оценки эффективности различных средств и систем наблюдения по их способности устанавливать факт присутствия объектов поиска в обследуемых ими зонах и районах наблюдения.

Поисковая ситуация — ситуация, в которой существует или возникает необходимость поиска и обнаружения целей. Она обычно характеризуется условиями проведения поиска — например, наличием информации о выходе цели из пункта базирования, о возможных или наиболее вероятных значениях курса и скорости ее движения, о зоне возможного ее местоположения в контролируемом районе, о наиболее вероятных направлениях ее подхода и прорыва системы наблюдения и охранения обороняемых объектов и др.

Поисковая ситуация может возникнуть как перед началом, так и в ходе боевых действий. Как правило, каждая поисковая ситуация связана с неопределенностью информации об условиях поиска и характеризуется часто недостаточно полными данными о характере, месте и движении цели. В связи с этим поиск является таким действием, которое призвано исключить неопределенность информации о цели.

Поисковые действия (операции) — действия (операции) по использованию средств и систем наблюдения для решения задач поиска и обнаружения целей в тех или иных интересующих командование районах и зонах.

Поисковые усилия — усилия по организации и осуществлению поиска, включающие мероприятия по подготовке сил и средств, их распределению по зонам и районам поиска и по построению систем наблюдения и освещения обстановки на возможных театрах военных действий.

В зависимости от направленности поисковых усилий различают первичный и вторичный виды поиска.

Первичный поиск проводится для первичного обнаружения целей, для контроля и освещения обстановки в обследуемой зоне, для выдачи основных ориентирующих данных о местоположении и движении целей.

Вторичный поиск проводится для вторичного обнаружения целей и вывода на контакт сил и средств слежения, для получения более точных данных о целях, необходимых для использования сил и средств поражения.

1.2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ

В современных условиях все большее значение приобретает создание непрерывных по фронту и эшелонированных по глубине систем наблюдения и разведки [4, 6; 9, 28, 31, 38, 45, 55, 57, 60, 61]. Эти системы могут быть призваны решать разнообразные задачи освещения обстановки и различные задачи информационного обеспечения управления, начиная от задач своевременного обнаружения и распознавания объектов, определения их координат и элементов движения и кончая задачами формирования наглядных изображений обстановки и выдачи информации на соответствующие пункты управления силами и средствами [8, 28, 31, 36, 40, 45, 55, 60]. От своевременного обнаружения и распознавания объектов, непрерывного слежения за их местоположением и движением зависит успешность борьбы со средствами нападения.

Призванные решать указанные задачи системы наблюдения и информации могут быть основаны на использовании как отдельных мощных средств (например, станций дальнего и сверхдальнего обнаружения объектов), так и комплексов разнородных и однородных средств меньшей мощности [17, 24, 28, 29, 31, 34, 38, 40, 42, 43, 45, 53, 55, 57, 60, 61]. При этом в качестве составляющих элементов этих систем наблюдения (как информационных подсистем систем управления) могут широко применяться как неподвижные (стационарные), так и подвижные (маневренные) средства и системы поиска и обнаружения целей, работающие по принципу как активного, так и пассивного действия и решающие задачи поиска и обнаружения объектов в различных физических средах и условиях.

Системы наблюдения могут строиться по принципу совмещенного или несомещенного с обеспечиваемыми (охраняемыми) объектами расположения средств.

Большое разнообразие возможных вариантов построе-

ния и использования средств и систем наблюдения обуславливает трудности оценки их эффективности. Поэтому необходимо выработать некоторые общеметодологические основы для достаточно общего подхода к оценке эффективности поиска и обнаружения целей различными средствами и системами наблюдения. Первым шагом на этом пути является определение основных принципов классификации различных систем наблюдения.

Под системой наблюдения мы будем понимать отдельное мощное средство либо совокупность однородных (разнородных) средств обнаружения, связанные единством решаемых задач и общей структурой построения, т. е. связанных и согласованных организационно, логически и технически.

Для определения общего методологического подхода к оценке эффективности обнаружения целей все разнообразие простых и сложных систем наблюдения целесообразно классифицировать по следующим характерным признакам.

1. По назначению:

— системы первичного поиска и обнаружения, обеспечивающие получение данных для освещения обстановки о целях;

— системы вторичного поиска и сопровождения целей, непосредственно обеспечивающие функционирование специальных сил и средств слежения и уничтожения.

2. По степени подвижности носителей средств наблюдения:

— неподвижные (стационарные) системы;

— подвижные (маневренные) системы.

3. По характеру обеспечиваемого объекта:

— системы, обеспечивающие действия отдельных объектов (узлов обороны, кораблей, самолетов);

— системы, обеспечивающие действия группировок сил.

4. По количеству используемых средств:

— системы, в которых используются одиночные средства;

— системы, в которых используются совокупности средств.

5. По расположению относительно обеспечиваемого объекта:

— совмещенные системы;

— несовмещенные системы.

6. По характеру своего действия:

— системы, пассивно ждущие прихода цели в свои зоны действия (обнаружения);

— системы, активно ищущие цель и за пределами зон действия своих средств обнаружения (за счет переноса этих зон в пространстве подвижными носителями средств).

7. По характеру операционной зоны (общей позиции) использования средств наблюдения:

- системы, используемые в районе;
- системы, используемые на рубеже.

8. По особенностям построения и действия:

— системы, действующие в заданной точке (отдельные станции);

— системы, действующие на заданной линии (цепи станций; линейно-патрулирующие на рубежах самолеты, корабли и автомобили — носители станций);

— системы, действующие в горизонтальной или вертикальной плоскости (поля и барьеры наблюдения);

— системы, действующие в пространстве.

9. По степени непрерывности действия:

— системы непрерывного действия;

— системы периодического (регулярно повторяющегося) действия;

— системы эпизодического (нерегулярного) действия;

— системы разового действия.

10. По степени скрытности действия:

— системы скрытного наблюдения;

— системы нескрытного наблюдения.

1.3. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СОВМЕЩЕННЫХ И НЕСОВМЕЩЕННЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ

Совмещенные системы наблюдения устанавливаются вблизи объектов или непосредственно на самих объектах, например носителях оружия. Средства наблюдения в таких системах совмещены по месту установки с обеспечиваемым оружием. Для таких систем наиболее характерны ситуации поиска и обнаружения целей (атакующих или атакуемых), движущихся на курсовых параметрах, близких к нулю (рис. 1.1).

Обнаружение и выявление целей в этих системах, определение координат и элементов движения и поражение их огнем должно быть осуществлено до подхода целей к охраняемым объектам на опасные расстояния.

Это обуславливает специфику оценки эффективности обнаружения и выявления целей в совмещенных системах на начальных участках траекторий движения целей в зонах действия систем наблюдения охраняемых объектов.

Несовмещенные системы наблюдения располагаются на некоторых расстояниях от охраняемых объектов. Они обычно создаются на открытых пространствах суши и моря за счет использования специальных сил и средств наблюдения и разведки. Трудности их построения обычно обусловлены большими размерами районов (зон) наблюдения и освещения обстановки на открытых театрах, трудностями выбора наиболее важных районов и зон, спецификой нарезки позиций наблюдения различным поисковым си-

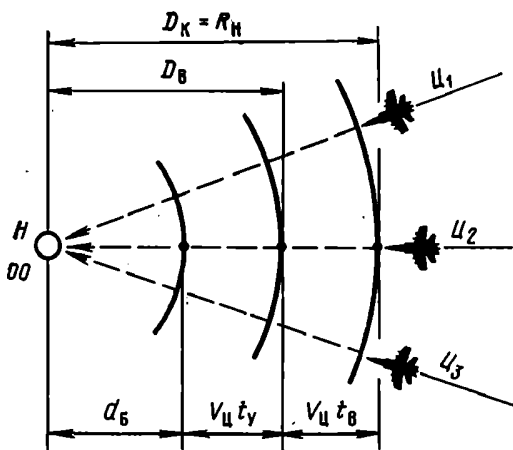


Рис. 1.1. Принципиальная схема рубежей действия совмещенной системы наблюдения:

ОО — обеспечиваемый (охраняемый) объект;
H — наблюдатель; Ц₁, Ц₂, Ц₃ — цели № 1, 2, 3

лам и средствам, трудностями размещения и обеспечения их сохранности на местности и позициях наблюдения.

В отличие от совмещенных систем в несовмещенных системах наблюдения эффективность обнаружения и выявления целей обычно оценивается на основе учета полного прохождения целями зон действия средств обнаружения систем наблюдения и разведки при тех или иных значениях курсовых параметров прохода целей относительно средств обнаружения (рис. 1.2).

В совмещенной системе необходимая дальность обнаружения (установления контакта) D_K относительно обеспечиваемого объекта может быть меньше или равна дальности действия средств обнаружения наблюдателя R_H , а в

несовмещенной системе D_K может быть значительно больше R_H .

Дистанция ввода в действие (начала функционирования) системы управления в том и другом случае обуславливается дальностью выявления цели D_B , отличающейся от D_K на величину проникновения цели за время ее выявления t_B :

$$D_B = D_K - V_{ц} t_B. \quad (1.1)$$

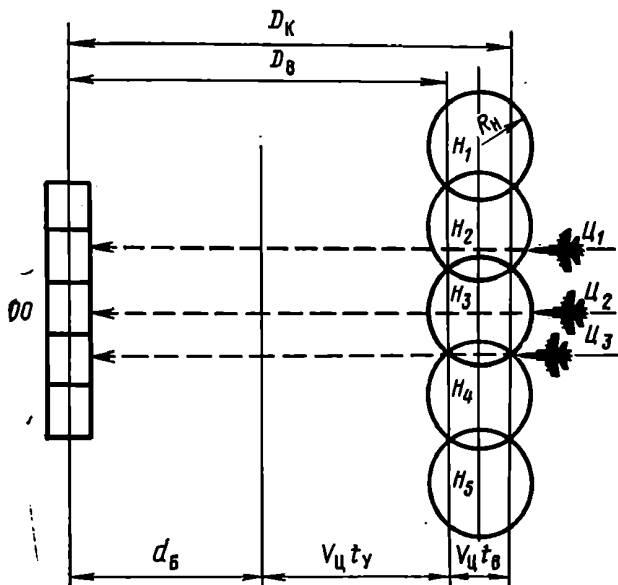


Рис. 1.2. Принципиальная схема рубежей действия несовмещенной системы наблюдения:

H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 — наблюдатели № 1, 2, 3, 4, 5;
 $Ц_1, Ц_2, Ц_3$ — цели № 1, 2, 3; $ОО$ — обеспечиваемый (охраняемый) объект

Соответственно дистанция боевого воздействия d_6 (например, дистанция применения оружия или дистанция начала разворачивания сил) будет отличаться от D_B на величину проникновения цели за время реагирования системы боевого управления t_y :

$$d_6 = D_B - V_{ц} t_y. \quad (1.2)$$

Таким образом, в обоих случаях система наблюдения через время t_B (рабочее время) оказывает непосредствен-

ное влияние на степень боевой готовности обеспечиваемых объектов, на своевременность принятия ими соответствующих мер боевого воздействия или защиты [36, 44].

Как было сказано ранее, системы наблюдения могут основываться на использовании разнообразных подвижных и неподвижных поисковых средств, сил и подсистем, но во всех случаях они могут быть совмещенного либо несовмещенного типа. Системы наблюдения того и другого типа могут быть построены для обеспечения как подвижных (маневренных), так и неподвижных (стационарных) объектов.

В случае обеспечения подвижных объектов при определении величин D_n и d_6 в формулах (1.1) и (1.2) вместо V_n для совмещенных систем должно быть поставлено значение суммарной скорости сближения цели и наблюдателя V_c , характеризующее общей величиной изменения расстояния между ними в единицу времени (ОВИР):

$$V_c = \text{ОВИР} = V_n \cos q_n + V_{nn} \cos q_{nn}, \quad (1.3)$$

где q_n — курсовой угол цели;

q_{nn} — курсовой угол наблюдателя, а для несовмещенных систем в формулах (1.1) и (1.2) ставится значение относительной скорости, т. е. скорости движения одного объекта относительно другого:

$$V_0 = \sqrt{V_n^2 + V_{nn}^2 - 2V_n V_{nn} \cos \Phi}, \quad (1.4)$$

где Φ — угол разности курсов движения цели и наблюдателя.

Таким образом, от своевременности решения задач обнаружения и выявления целей совмещенными и несовмещенными системами наблюдения зависит своевременность ввода в действие тех или иных систем управления силами и оружием обеспечиваемых объектов.

Низкое качество решения задач наблюдения и освещения будет обуславливать и низкое качество управления. Получение ложной и недостоверной информации о целях может вызвать и ложные срабатывания системы управления и всей системы действий обеспечиваемого объекта по фиктивной цели. А несвоевременное получение хотя и качественной информации о цели может привести к несвоевременным (запоздалым) действиям против нее обеспечиваемого объекта и всех его сил и средств.

Более подробное рассмотрение систем наблюдения как источников информации о целях и изложение вопросов

оценки эффективности информационного обеспечения боевого управления не входит в нашу задачу.

1.4. ПРИБОРНЫЙ И ТАКТИЧЕСКИЙ СПОСОБЫ ПОИСКА, ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Приборный поиск — такой вид поиска, при котором обследование пространства поиска осуществляется лишь за счет использования соответствующих режимов работы и методов обзора, свойственных самим средствам (приборам) наблюдения.

Тактический поиск — поиск, при котором обследование пространства поиска достигается не только за счет использования режимов и способов обзора, имеющихся у самих средств (приборов) наблюдения, но и главным образом за

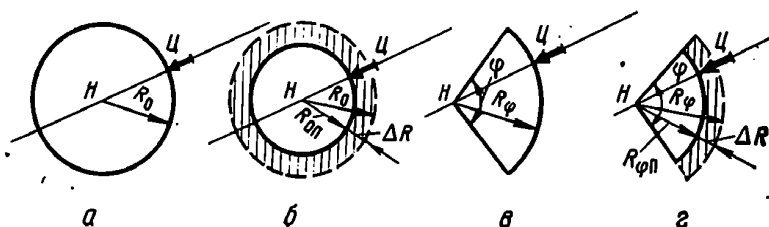


Рис. 1.3. Площадь обследования и площадь освещения при основных способах приборного поиска:

H — наблюдатель, C — цель

a — НКО; $б$ — ПКО; $в$ — НСО; $г$ — ПСО

счет переноса их зоны действия в пространстве поиска путем соответствующего маневрирования носителей средств (приборов) наблюдения.

В теоретических обоснованиях способов использования технических средств наблюдения и разведки обычно различают следующие типовые способы приборного поиска (рис. 1.3).

Непрерывный круговой обзор (НКО) осуществляется за счет вращения вкруговую диаграмм направленности радио- и гидролокационных станций или за счет использования всенаправленных характеристик приема поисковых станций.

Непрерывный секторный обзор (НСО) осуществляется, например, за счет качания луча диаграммы направленности либо за счет ограничения излучения локатора в секторе при круговом вращении диаграммы направленности.

Периодический круговой обзор (ПКО) осуществляется, например, за счет периодического (с паузами молчания) излучения локатора при непрерывном быстром вращении диаграммы направленности.

Периодический секторный обзор (ПСО) осуществляется как и НСО, но с периодическим применением перерывов (пауз молчания) в работе локатора.

Каждый из перечисленных способов может быть весьма просто охарактеризован определенными количественными показателями эффективности, например обеспечиваемой дальностью обнаружения цели (дальностью установления контакта с целью) R , размерами площади обследования (обзора) $S_{\text{обс}}$ и площади освещения (выявления цели) $S_{\text{осв}}$.

В самом деле, если обозначить эффективную (обеспечиваемую) дальность установления контакта: при НКО — R_0 , при ПКО — $R_{\text{оп}}$, при НСО — R_{φ} и при ПСО — $R_{\varphi\text{н}}$, то могут быть выведены соответствующие количественные характеристики для указанных показателей эффективности приборного поиска. Рассмотрим это применительно к случаю поиска и обнаружения целей, движущихся со скоростью $V_{\text{ц}}$ и сближающихся с неподвижным наблюдателем ($V_{\text{н}}=0$) на курсовом параметре, равном нулю, т. е. курсы целей проходят через точку, где стоят наблюдатели (средства наблюдения).

В случаях *а* и *в* (см. рис. 1.3) движение цели не вызывает уменьшения зоны действия средств наблюдения, тогда как в случаях *б* и *г* за счет пауз $t_{\text{п}}$ происходит заметное сокращение глубины зоны обнаружения (уменьшение дальности установления контакта с целью) на величину ΔR , характеризующую величину проникновения цели незамеченной за время $t_{\text{п}} \gg T$, где T — период одного оборота антенны

$$\Delta R = V_{\text{ц}} t_{\text{п}}. \quad (1.5)$$

Исходя из этого обеспечиваемая при том или ином способе обзора дальность установления контакта с целью R может определяться следующими соотношениями:

а) Для НКО

$$\Delta R = 0 \text{ и } R = R_0, \quad (1.6)$$

где R_0 — дальность действия (обнаружения) в режиме НКО.

б) Для ПКО

$$\Delta R = V_{\text{ц}} t_{\text{п}} \text{ и } R = R_0 - \Delta R = R_0 - V_{\text{ц}} t_{\text{п}}. \quad (1.7)$$

в) Для НСО

$$\Delta R = 0 \text{ и } \dot{R} = \dot{R}_\varphi, \quad (1.8)$$

где R_φ — дальность действия (обнаружения) в режиме НСО.

Например, для локоаторов, использующих при НСО по сравнению с НКО режим качания луча, за счет увеличения плотности обзора в секторе может быть достаточно обоснованно принято

$$R_\varphi = (1,1 \div 1,2) R_0, \quad (1.9)$$

где коэффициент 1,1 — для больших секторов, 1,2 — для малых.

г) Для ПСО

$$\Delta R = V_{\text{цп}} t_{\text{п}} \text{ и } R = R_\varphi - \Delta R = R_\varphi - V_{\text{цп}} t_{\text{п}}. \quad (1.10)$$

Соответственно могут быть определены и величины $S_{\text{обс}}$ и $S_{\text{осв}}$:

а) Для НКО

$$S_{\text{обс}} = S_{\text{осв}} = \pi R_0^2. \quad (1.11)$$

б) Для ПКО

$$S_{\text{обс}} = \pi R_0^2;$$

$$S_{\text{осв}} = \pi (R_0 - \Delta R)^2 = \pi (R_0 - V_{\text{цп}} t_{\text{п}})^2. \quad (1.12)$$

в) Для НСО

$$S_{\text{обс}} = S_{\text{осв}} = \pi R_\varphi^2 \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\varphi}{2} R_\varphi^2, \quad (1.13)$$

где φ — величина сектора наблюдения в радианах.

г) Для ПСО

$$S_{\text{обс}} = \pi R_\varphi^2 \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\varphi}{2} R_\varphi^2;$$

$$\begin{aligned} S_{\text{осв}} &= \pi (R_\varphi - \Delta R)^2 \frac{\varphi}{2\pi} = \pi (R_\varphi - V_{\text{цп}} t_{\text{п}})^2 \frac{\varphi}{2\pi} = \\ &= \frac{\varphi}{2} (R_\varphi - V_{\text{цп}} t_{\text{п}})^2. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Кроме того, могут рассматриваться также различные модификации указанных четырех основных способов приборного поиска, базирующиеся на различных сочетаниях рассмотренных типовых способов поиска между собой и их комбинациях со способами непрерывного (НС) и периодического (ПС) сопровождения цели прибором наблюдения.

С учетом этого на рис. 1.4 показаны все возможные разновидности основных и комбинированных способов при-

борного поиска. Указанные 12 способов приборного поиска в той или иной мере могут быть свойственны всем видам средств наблюдения, имеющим однопестковую диаграмму направленности и осуществляющим обследование пространства путем достаточно быстрого вращения диаграммы направленности (радио- и гидролокаторы, станции радиолокационной разведки).

Подобным же образом могут быть рассмотрены и способы обзора пространства, осуществляемого посредством

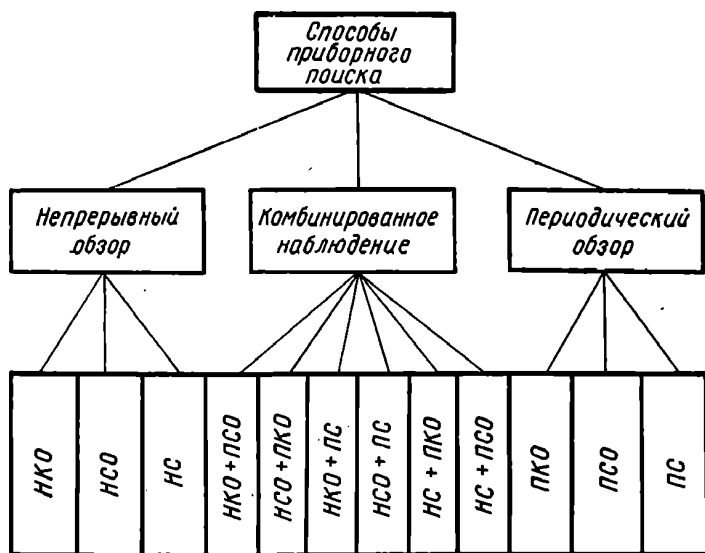


Рис. 1.4. Разновидности основных и комбинированных способов приборного поиска

электронного сканирования луча, и найдены для них характеристики $S_{\text{обс}}$ и $S_{\text{осв}}$. Путь определения их очевиден.

Аналогично можно говорить и о различных способах тактического поиска — способах обследования пространства путем маневрирования подвижного наблюдателя (поисковой единицы) и применения того или другого способа приборного поиска. Очевидно, что эффективность тактического поиска по его производительности (величине просматриваемой за единицу времени площади пространства поиска) и степени освещения обстановки о наличии цели в контролируемом районе будет зависеть от эффективности

применяемого при этом наблюдателем способа приборного поиска и эффективности выбранного способа маневрирования наблюдателя (поисковой единицы). Тактический поиск, как и приборный, может быть также просто охарактеризован по эффективности (в детерминированной постановке этого вопроса) с помощью показателей $S_{обс}$ и $S_{осв}$.

Рассмотрим это для случая поиска неподвижной цели ($V_{ц}=0$), местоположение которой в районе неизвестно (иначе говоря, место которой равномерно распределено по площади района поиска), применительно к наблюдателю, движущемуся со скоростью $V_{н}$ и использующему при этом тот или иной способ приборного поиска.

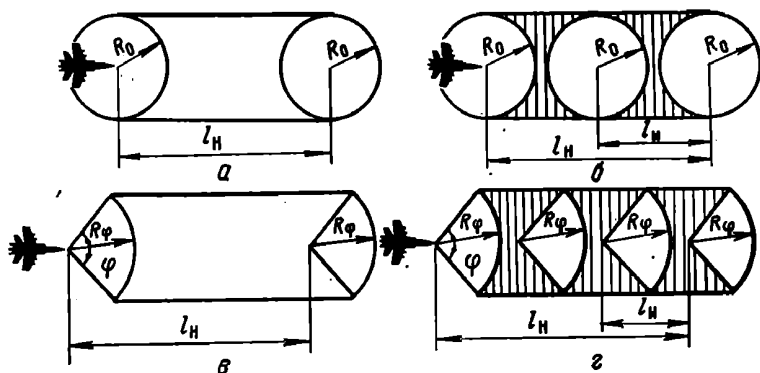


Рис. 1.5. Площадь обследования и площадь освещения при тактическом поиске с использованием основных способов приборного поиска:

а — НКО; б — ПКО; в — НСО; г — ПСО.

Величины $S_{обс}$ и $S_{осв}$ могут быть определены из следующих соотношений (рис. 1.5):

а) При НКО

$$S_{обс} = S_{осв} = \pi R_0^2 + 2R_0 l_n, \quad (1.15)$$

где l_n — длина траектории наблюдателя, т. е. пройденный им при поиске путь за время наблюдения t_n ; $l_n = V_n t_n$.

б) При ПКО (как и при НКО)

$$S_{обс} = \pi R_0^2 + 2R_0 l_n = \pi R_0^2 + 2R_0 V_n t_n;$$

$$S_{осв} = \left[E \left(\frac{l_n}{l_n} \right) + 1 \right] \pi R_0^2 = \left[E \left(\frac{t_n}{t_n} \right) + 1 \right] \pi R_0^2, \quad (1.16)$$

где l_n — линейный интервал (расстояние) между включениями прибора (средства) наблюдения для краткого обзора пространства поиска $l_n = V_n t_n$;

t_n — временной интервал между включениями прибора наблюдения поисковой единицы;

$E(\dots)$ — целая часть выражения, находящегося в скобках.

в) При НСО

$$\begin{aligned} S_{обс} &= S_{осв} = \pi R_\varphi^2 \frac{\varphi}{2\pi} + t_n 2R_\varphi \sin \frac{\varphi}{2} = \\ &= \pi R_\varphi^2 \frac{\varphi}{2\pi} + 2R_\varphi V_n t_n \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{\varphi}{2} R_\varphi^2 + 2R_\varphi V_n t_n \sin \frac{\varphi}{2}. \end{aligned} \quad (1.17)$$

г) При ПСО (как и при НСО)

$$\begin{aligned} S_{обс} &= \frac{\varphi}{2} R_\varphi^2 + 2R_\varphi V_n t_n \sin \frac{\varphi}{2}; \\ S_{осв} &= \left[E\left(\frac{t_n}{t_n}\right) + 1 \right] \pi R_\varphi^2 \frac{\varphi}{2\pi} = \left[E\left(\frac{t_n}{t_n}\right) + 1 \right] \frac{\varphi}{2} R_\varphi^2. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Аналогичным образом могут быть определены подобные характеристики и для других условий поиска, например с учетом наложения смежных зон обзора друг на друга при малых значениях интервала t_n (рис. 1.5, б, г).

Важно отметить, что для тактического поиска показатели $S_{обс}$ и $S_{осв}$ являются общими количественными характеристиками производительности поиска по величине обследуемой и освещаемой за время поиска t_n площади района поиска. От них легко можно перейти и к другим характеристикам, например показателям удельной производительности поиска, а также к характеристикам интенсивности и вероятности установления тактических контактов.

Знание рассмотренных выше показателей эффективности различных способов приборного и тактического поиска будет необходимо далее при изложении в главах 3 и 4 некоторых методов оценки эффективности поиска и обнаружения целей.

1.5. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛИ. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОБЩЕЙ МЕТОДОЛОГИИ

При оценке эффективности поиска и обнаружения целей могут быть использованы различные показатели и критерии [1—3; 12, 18, 20—22, 25—27, 32, 33, 35, 39, 47—52, 56, 58, 59, 61]. Мы остановимся на рассмотрении количественных характеристик так называемых приборных и тактических контактов с действительными реальными целями. Под действительными реальными целями понимаются ре-

альные объекты поиска и обнаружения. Об этом приходится говорить потому, что при обнаружении целей с помощью некоторых видов технических средств наблюдения, например радиолокаторов и гидролокаторов, за действительные реальные цели могут быть приняты и различные реально существующие, но ложные цели, которые не являются объектами обнаружения, но которые способны давать такие же отметки на индикаторах технических средств наблюдения, как и действительные реальные цели.

Действительные и ложные реальные цели, попадающие в зону действия средств наблюдения, обуславливают формирование действительного сигнала цели (реализация события правильного обнаружения цели).

С другой стороны, при установлении энергетического контакта возможны случаи пропуска реальных и обнаружения мнимых целей за счет отдельных выбросов шумов (реализация события ложной тревоги).

Из практики известно, что операторы, обслуживающие средства наблюдения, для преодоления неопределенности суждения о характере обнаруженной отметки и принятия решения о факте обнаружения действительной реальной цели применяют соответствующие критерии оценки ситуации установления энергетического контакта.

Например, оператор докладывает об обнаружении цели в случае, если получены две отметки цели:

- в двух смежных обнаруживающих обзорах $(+ +)^*$;
- через один необнаруживающий обзор $(+ - +)$;
- через два необнаруживающих обзора $(+ - - +)$.

Вопросы классификации энергетического контакта и оценки вероятности обнаружения сигнала цели оператором рассматриваются теорией обнаружения сигналов.

Например, вероятность установления энергетического контакта $P_{\text{эк}}$ может быть описана [26] как вероятность правильного обнаружения $P_{\text{по}}$:

$$P_{\text{по}} = 1 - P_{\text{лт}} - P_{\text{пц}}, \quad (1.19)$$

где $P_{\text{лт}}$ — вероятность ложной тревоги;

$P_{\text{пц}}$ — вероятность пропуска цели.

Формула (1.19) учитывает полную группу событий, характеризующих акт принятия решения об обнаружении сигнала цели и классификацию энергетического контакта с ней, в связи с чем можно считать, что

$$P_{\text{эк}} = P_{\text{по}}. \quad (1.20)$$

* + есть отметка цели в данном обзоре,
— нет отметки цели в данном обзоре.

При этом учитывается эффективность обнаружения сигнала цели и эффективность классификации контакта с действительной реальной целью. Полные вероятности этих событий [26]

$$P_{\text{лт}} = P_{\text{лто}} P'_{\text{лтк}} + P_{\text{тп}} P''_{\text{лтк}} - P_{\text{лто}} P_{\text{тп}} P'_{\text{лтк}} P''_{\text{лтк}}, \quad (1.21)$$

где $P_{\text{лто}}$ — безусловная вероятность возникновения ложной тревоги в процессе установления энергетического контакта в условиях помех (шумов);

$P_{\text{тп}}$ — безусловная вероятность принятия сигнала ложного объекта за сигнал от цели в процессе установления энергетического контакта с целью;

$P'_{\text{лтк}}$ — условная вероятность ложной тревоги в процессе классификации энергетического контакта с целью при условии, что имела место ложная тревога в процессе установления энергетического контакта;

$P''_{\text{лтк}}$ — условная вероятность ложной тревоги в процессе классификации энергетического контакта с целью при условии, что в процессе установления энергетического контакта сигнал ложного объекта принят за сигнал от цели;

$$P_{\text{пц}} = P_{\text{псц}} + (1 - P_{\text{псц}}) P'_{\text{пц}}, \quad (1.22)$$

где $P_{\text{псц}}$ — безусловная вероятность пропуска сигнала цели в процессе установления энергетического контакта с ней;

$P'_{\text{пц}}$ — условная вероятность пропуска цели в процессе классификации энергетического контакта при условии, что в процессе установления энергетического контакта был обнаружен сигнал цели.

Для существующих средств наблюдения в книге рассматриваются методы оценки эффективности:

- установления тактических контактов;
- установления приборных контактов.

Они могут быть широко использованы на практике при анализе и оценке эффективности существующих, а также при синтезе и обосновании принципов построения и способов использования вновь создаваемых средств и систем наблюдения.

Оценка эффективности обнаружения целей при использовании как стационарных, так и подвижных систем наблюдения связана, с одной стороны, с оценкой вероятности вхождения подвижных целей в зоны действия средств

обнаружения и, с другой стороны, с оценкой вероятности обнаружения этих целей при их прохождении через зоны действия этих средств.

Но при оценке эффективности обнаружения цели подвижными системами наблюдения вместо истинного движения должно учитываться относительное перемещение цели.

Для определенного построения системы наблюдения (совмещенная или несовмещенная) свойственны свои наиболее характерные траектории движения целей в зонах действия средств обнаружения этих систем и определенные методы оценки ожидаемой вероятности обнаружения целей.

Поскольку в общем процессе обнаружения установление тактического и приборного контакта суть два последовательных и относительно независимых действия, то вероятность обнаружения цели $P_{обн}$ может быть условно представлена как произведение вероятностей двух последовательных и независимых событий: вероятности установления тактического контакта $P_{утк}$ и вероятности установления приборного контакта $P_{упк}$:

$$P_{обн} = P_{утк} P_{упк} \quad (1.23)$$

Первая вероятность может при этом рассматриваться в качестве критерия эффективности тактического поиска при исследовании и оценке эффективности различных видов этого поиска в тех или иных поисковых ситуациях, а вторая — критерия эффективности приборного поиска при исследовании и оценке эффективности различных его видов соответственно в тех или иных физических условиях.

Для «ждущих» (позиционных) систем $P_{утк}$ может определяться как вероятность вхождения цели из достаточно обширного возможного района ее действия в зону обнаружения системы наблюдения за время функционирования системы. Для «ищущих» (подвижных) систем $P_{утк}$ может определяться как вероятность попадания цели в зону действия системы наблюдения за время обследования района возможного местонахождения цели данной системой.

В свою очередь $P_{упк}$ для совмещенных систем наблюдения определяется применительно к траекториям движения целей, проходящим на курсовом параметре, равном или близком к нулю, а для несовмещенных систем наблюдения — применительно к траекториям, соответствующим курсовым параметрам, неравным нулю.

В частных случаях оценка вероятности обнаружения цели системой (средствами) наблюдения может сводиться только к определению $P_{утк}$ или $P_{упк}$.

Действительно, если оценивается только возможность вхождения целей в зоны действия средств (систем) наблюдения, когда можно положить достоверным обнаружение целей в этих зонах, т. е. когда $P_{упк}=1$, то формула (1.23) приводится к виду

$$P_{сбн} = P_{утк}, \quad (1.24)$$

и наоборот, когда оценивается только возможность обнаружения целей в зонах действия средств (систем) наблюдения, т. е. когда может быть принято $P_{утк}=1$, формула (1.23) принимает вид

$$P_{сбн} = P_{упк}. \quad (1.25)$$

Поэтому эффективность систем наблюдения при тактическом поиске характеризуется вероятностью установления тактического контакта, а при приборном поиске — вероятностью установления приборного контакта.

Методы определения этих вероятностей рассматриваются в главах 3 и 4 на основе соответствующих методов оценки ожидаемой дальности действия средств наблюдения (гл. 2).

Глава 2

ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ СРЕДСТВ НАБЛЮДЕНИЯ

2.1. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОЖИДАЕМОЙ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ

При построении и расчете систем наблюдения, определении количественных характеристик ожидаемой вероятности установления приборных и тактических контактов и при оценке эффективности поиска и обнаружения целей в различных ситуациях одним из важнейших вопросов является вопрос оценки ожидаемой дальности действия средств наблюдения R .

Очевидно, что дальность действия средств наблюдения определяется их техническими параметрами, параметрами среды и характеристиками целей.

Для всех видов технических средств наблюдения существуют соответствующие зависимости, позволяющие оценивать ожидаемую дальность их действия с той или иной точностью в зависимости от влияния на обнаружение цели физических условий, в которых будет проводиться поиск.

Например, дальность действия радиолокационной станции в зависимости от ее параметров и характеристик цели [11, 19, 23, 27] может быть определена по формуле

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_n G \lambda^3 \sigma}{(4\pi)^3 P_n}}, \quad (2.1)$$

где P_n — импульсная мощность передатчика, Вт;

G — коэффициент усиления приспосабливаемой антенны;

λ — длина волны, м;

σ — эффективная отражающая поверхность цели, м²;

P_n — чувствительность приемника, Вт.

Соответственно дальность действия станции поиска (разведки) работающих радиолокационных средств может быть найдена по формуле

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{ц}} G_{\text{ц}} G}{P_{\text{п}}}}, \quad (2.2)$$

где $P_{\text{ц}}$ — импульсная мощность передатчика цели, Вт;
 $G_{\text{ц}}$ — коэффициент усиления передающей антенны цели.
 Дальность действия в километрах гидролокатора [26] описывается зависимостью

$$R = \sqrt[8]{\frac{W_{\text{а}} S^2 \tau r_{\text{с}}^2}{c^4 A k^3}}, \quad (2.3)$$

где $W_{\text{а}}$ — акустическая мощность станции, Вт;
 S — площадь поверхности акустической системы, м²;
 $r_{\text{с}}$ — радиус сферы, эквивалентной по интенсивности отражения цели, м;
 τ — длительность излучаемого импульса, с;
 c — скорость распространения звука в воде, м/с;
 A — интенсивность шума для стандартных условий, Вт Гц/м²;
 k — отношение сигнал/помеха на входе решающего устройства, которое обеспечивает заданную вероятность правильного обнаружения.

Дальность действия в километрах станции поиска (разведки) работающих гидролокаторов описывается формулой

$$R = \sqrt[6]{\frac{W_{\text{а}} S^2 \tau}{c^4 A k^3} \cdot 10^{12}}. \quad (2.4)$$

Приведенные аналитические выражения для дальности действия активных и пассивных радиолокационных и гидроакустических средств дают представление о так называемой энергетической дальности, т. е. о дальности обнаружения, определяемой энергетическими соотношениями. Здесь приведены лишь простейшие аналитические выражения для расчета ожидаемой дальности действия средств в так называемых стандартных, идеализированных условиях. Они даны лишь для иллюстрации прямого аналитического подхода к определению дальности действия средств и не могут быть рекомендованы для конкретных условий использования средств на практике.

Значения дальностей обнаружения целей, полученные в конкретных условиях практического использования средств, могут сильно отличаться от величин, рассчитываемых по приведенным формулам.

Поэтому эти формулы используются лишь для грубо ориентировочной оценки ожидаемой дальности обнаружения целей исходя из принципа действия средств, когда нет других возможностей для получения более точных оценок ожидаемой дальности обнаружения.

Проведение более точных расчетов требует и более тщательного учета характера предстоящих условий и степени их влияния на дальность обнаружения цели. Все это усложняет методики аналитических расчетов ожидаемой дальности действия средств и ограничивает использование этих методик в практике оперативно-тактических расчетов. Важно отметить, что методики прямых аналитических расчетов позволяют рассчитывать ожидаемую дальность лишь как вполне определенную (детерминированную) однозначную характеристику и не учитывают существующую нестабильность физических условий, проявляющуюся во флуктуации параметров, характеризующих состояние средств наблюдения, объектов поиска и среды, тогда как обычно дальность действия средства наблюдения является не детерминированной, а случайной величиной, которая характеризуется тем или иным законом распределения вероятности ее появления. При расчете ожидаемой дальности действия средств используется вероятностно-статистический метод, при котором успешность обнаружения цели на той или иной дальности оценивается с помощью статистически обоснованной вероятности получения указанной дальности.

Исходя из принятой в данной книге методологии, указанный вероятностно-статистический метод используется далее как базовый и при оценке эффективности обнаружения целей в зонах действия средств наблюдения. Поэтому несколько подробнее остановимся на нем.

В отличие от прямого чисто аналитического метода, основанного на непосредственном измерении и последующем учете в соответствующих аналитических выражениях тех или иных факторов, вероятностно-статистический метод предусматривает косвенный их учет. Это производится на основе выявления и использования соответствующих закономерностей, полученных из статистики и устанавливающих связь между полученными дальностями обнаружения и параметрами физических условий наблюдения, характе-

ризующими состояние средств наблюдения, среды и обнаруживаемых целей. При этом могут быть использованы как данные из опыта эксплуатации или испытаний средств [3, 9, 18, 20, 21, 25, 32, 35, 39, 46, 51, 54, 56, 58], так и данные аналитического моделирования распределений дальности обнаружения целей [11, 19, 23, 26, 27, 30, 37, 47].

В связи с этим можно говорить и о двух подходах к вопросу вероятностной оценки дальности действия средств наблюдения — теоретико-статистическом и практико-статистическом.

Дальнейшее совершенствование того и другого подходов (методов) проявляется в формировании двух характерных направлений оценки эффективности, которые могут быть условно названы как теоретико-статистическое моделирование и практико-статистическое описание эффективности средств наблюдения.

Первое направление связано с обеспечением проектирования новых средств и основано на разработке и использовании теоретико-статистических моделей процессов обнаружения целей средствами технического наблюдения. Оно является как бы развитием прямого аналитического подхода и его перехода с чисто детерминированных на вероятностно-статистические позиции.

Второе направление связано с обеспечением внедрения существующих средств и основано на практико-статистической оценке эффективности средств наблюдения по опыту их практического использования и натурных испытаний. Это направление характеризуется соответствующим развитием от приемов простого обобщения данных статистики к достаточно строгому описанию современными методами процессов обнаружения целей.

Для иллюстрации применения методов теоретико-статистического моделирования в интересах вероятностно-статистической оценки ожидаемой дальности обнаружения (дальности действия средств наблюдения) рассмотрим кратко методику, приведенную в [11, 23, 27, 47]. При этом применительно к радиолокационному обнаружению целей обычно различают 5 основных моделей цели и сигнала:

- сильно флюктуирующая цель, дружно флюктуирующая пачка;
- сильно флюктуирующая цель, быстро флюктуирующая пачка;
- слабо флюктуирующая цель, дружно флюктуирующая пачка;

— слабо флюктуирующая цель, быстро флюктуирующая пачка;

— стабильная нефлюктуирующая цель.

Ожидаемая дальность действия (обнаружения) R в вероятностно-статистическом отношении определяется как функция

$$R = R(\sigma). \quad (2.5)$$

Каждому значению σ соответствует определенное значение R . Вероятность обнаружения цели на расстоянии, равном или большем R , будет обуславливаться вероятностью того, что σ будет принимать значения, равные или большие того, которое было поставлено в уравнение (2.1) при оценке дальности действия станций. В связи с этим различают 3 основных закона распределения плотности вероятности значений σ радиолокационных целей:

а) Для сильно флюктуирующих целей

$$\psi(\sigma) = \frac{1}{\bar{\sigma}} e^{-\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}}, \quad (2.6)$$

где $\bar{\sigma}$ — среднее значение эффективной отражающей поверхности цели.

б) Для слабо флюктуирующих целей

$$\psi(\sigma) = \frac{4\sigma}{\bar{\sigma}^2} e^{-\frac{2\sigma}{\bar{\sigma}}}. \quad (2.7)$$

в) Для стабильных нефлюктуирующих целей — закон равной вероятности ($\sigma = \bar{\sigma} = \text{const}$).

Тогда, например, для сильно флюктуирующих целей

$$P(\sigma \geq \bar{\sigma}) = \frac{1}{\bar{\sigma}} \int_{\bar{\sigma}}^{\infty} e^{-\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}} d\sigma = e^{-\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}}. \quad (2.8)$$

Так как $R \equiv \sqrt[4]{\sigma}$, то можно составить зависимость

$$\frac{R}{\bar{R}} = \sqrt[4]{\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}}, \quad (2.9)$$

где $\bar{R}$ — среднее значение дальности обнаружения.

Отношение $R/\bar{R}$ называется нормированной дальностью. Учитывая равенство (2.9), выражение (2.8) примет вид

$$P(\sigma \geq \bar{\sigma}) = e^{-\left(\frac{R}{\bar{R}}\right)^4}. \quad (2.10)$$

Таким образом с помощью выражения (2.10) устанавливается вероятностно-статистическая зависимость между R и σ , на основании которой может быть построена кривая a (рис. 2.1) для определения вероятности обнаружения сильно флюктуирующей цели. Аналогично, используя выражение (2.7), может быть построена кривая b для слабо флюктуирующей цели. Кривая $в$ для стабильной нефлюктуирующей цели ($\sigma = \text{const}$) характеризует случай получения строго определенной (достоверной) дальности $R = R_d$ — случай обнаружения цели по так называемому закону определенной дальности.

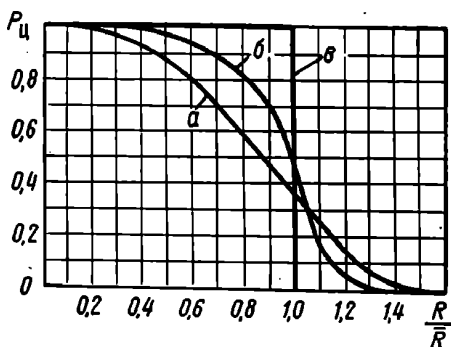


Рис. 2.1. Вероятность обнаружения сигнала цели:

a — сильно флюктуирующего; b — слабо флюктуирующего; $в$ — нефлюктуирующего

Приведенные на рис. 2.1 графики построены без учета влияния собственных шумов и принятой схемы обработки сигнала. При оценке совместного действия на вероятность обнаружения цели флюктуаций сигнала цели и внутренних шумов приемника учитывается возможное распределение интенсивностей отраженного сигнала цели в зависимости от вида и скорости флюктуаций σ (модели цели).

Значения вероятностей, соответствующие каждому из фиксированных значений интенсивности сигнала q , определяют лишь частные вероятности обнаружения цели, поскольку распределение интенсивности шумов не зависит от распределения интенсивности сигнала [23]. Искомая вероятность обнаружения цели P_d определяется путем усред-

нения частных вероятностей по всем возможным значениям q :

$$P_u = \int_0^{\infty} \Psi(q) \int_{U_0}^{\infty} \Psi(U_{сш}) dq dU, \quad (2.11)$$

где $\Psi(q)$ — плотность распределения интенсивности отраженного сигнала цели;

U_0 — пороговое значение напряжения сигнала;

$\Psi(U_{сш})$ — плотность вероятности огибающей суммы сигнала и шума (огибающей напряжения сигнал—шум);

$U_{сш}$ — напряжение сигнала при наличии шумов.

Закон распределения $\Psi(U_{сш})$ зависит от принятой схемы обработки, а U_0 определяется характером принятого критерия обнаружения — критерия принятия решения о факте обнаружения сигнала цели.

Кроме того, чтобы учитывать характер цели, все эти расчеты должны проводиться применительно к указанным выше пяти моделям цели и сигнала. В результате общая методика вероятностно-статистической оценки ожидаемой дальности действия сильно усложняется и становится трудно применимой в практике оперативно-тактических расчетов. Более того, существующие методики подобных расчетов применимы лишь для неподвижных целей и целей, движущихся на нулевом курсовом параметре [11, 23, 27, 47], что является лишь частным случаем движения реальных целей.

В связи с указанными ограничениями в практике оперативно-тактических расчетов все большее значение получают методы определения ожидаемой дальности действия, основанные на вероятностно-статистическом описании эффективности средств наблюдения по данным опыта их применения [3, 9, 18, 20, 21, 25, 32, 35, 39, 51, 56, 58].

Эти методы базируются на сборе и обобщении статистических данных по дальностям установления контактов (первичных обнаружений целей) при эксплуатации и при натурных испытаниях средств, на определении с помощью теории вероятности и теории поиска более универсальных характеристик эффективности обнаружения целей. Достоинством таких характеристик является возможность оценки вероятности установления контакта с целями при их движении по различным траекториям и при изменяющихся физических условиях наблюдения.

2.2. ПОНЯТИЕ О РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ

2.2.1. Неопределенность акта обнаружения цели прибором наблюдения. Случайный характер дальности установления приборного контакта

Опытным путем установлено, что цель, попавшая в зону действия прибора наблюдения, редко обнаруживается на пределе дальности его действия. Значительно чаще обнаружение происходит на более близких расстояниях. Вместе с тем также установлено, что в ряде случаев даже при относительно малых дальностях (значительно меньших средней дальности действия прибора наблюдения) цель может не обнаруживаться. Дело в том, что обнаружение зависит не только от дальности до цели, но и от ряда факторов, которые можно разделить на три группы:

- факторы, характеризующие прибор наблюдения;
- факторы, характеризующие условия распространения физических полей (сигналов) в среде;
- факторы, характеризующие цель.

В каждой из перечисленных групп имеются такие факторы, которые решающим образом влияют на закономерности изменения дальности действия прибора наблюдения. Эти факторы обычно называют основными. Например, для радиолокационной станции (РЛС) это мощность передатчика, эффективная площадь антенны, эффективная отражающая площадь цели, длина волны, высота антенны над уровнем моря и др. Изучая основные факторы, можно предсказать численное значение дальности действия, не прибегая к специальному опыту. По мере развития науки число учитываемых факторов становится все большим, влияние их на дальность действия изучается более подробно, а поэтому научный прогноз становится все точнее.

Но наряду с этим следует отметить, что любому закономерному явлению, в том числе и обнаружению целей, неизбежно сопутствуют случайные отклонения, а поэтому на практике, как бы точно и подробно ни были фиксированы условия опыта по определению дальности действия того или иного прибора наблюдения, невозможно достигнуть того, чтобы при повторении опыта результаты в точности совпадали [3, 20, 21, 39]. Эти случайные отклонения обуславливаются наличием таких второстепенных факторов: нестабильность питающего напряжения, изменение курсового угла цели относительно наблюдателя, положение ан-

тени при входе цели в зону действия РЛС, изотропность среды и др.

Кроме того, эффективность любого технического средства зависит от качества работы оператора как конечного регистрирующего элемента в общей схеме индикации, принимающего решение о факте обнаружения.

Различные значения регистрируемой дальности могут быть получены в одних и тех же условиях и при использовании различных критериев обнаружения, что связано с различными затратами времени на их реализацию.

Наряду с рассмотренными в разд. 1.5 критериями могут быть использованы и другие критерии обнаружения. Это зависит от требований, предъявляемых к надежности принятия решения о факте обнаружения цели.

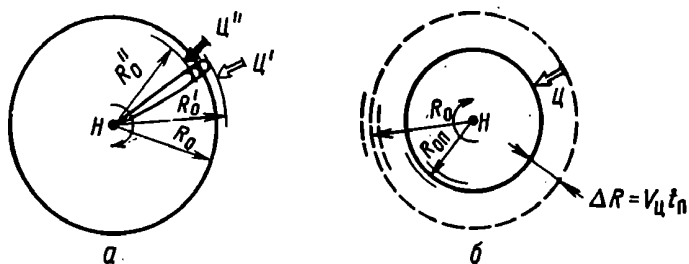


Рис. 2.2. Схема проникновения цели в зону обнаружения при непрерывном а и периодическом б круговом обзоре

Ранее было показано, что дальность обнаружения также зависит и от способа использования прибора наблюдения. Допустим (рис. 2.2, а), стационарный прибор наблюдения вначале используется в режиме непрерывного кругового обзора. Даже при постоянстве всех других факторов в течение периода одного обзора T дальность обнаружения будет несколько меняться, например в зависимости от момента и места подхода цели к зоне обнаружения по отношению к положению луча антенны станции.

Так, дальности установления контактов для целей Ц' и Ц'' будут соответственно отличаться на величину $\Delta R = V_{ц}T$:

$$R_0' = R_0 + 0,5V_{ц}T \text{ и } R_0'' = R_0 - 0,5V_{ц}T. \quad (2.12)$$

При этом одна из них меньше, а другая больше, чем R_0 , на величину среднего проникновения цели $0,5V_{ц}T$. Все это является следствием дискретности обзора, свойственной ре-

жиму НКО. Из этого следует, что при НКО в среднем будет освещаться площадь круга радиуса R_0 , равного среднестатистической в рассматриваемых условиях дальности действия прибора наблюдения. Теперь (рис. 2.2, б) представим, что наблюдатель включает прибор периодически через равные промежутки времени t_n (длительность T работы прибора наблюдения при каждом включении пренебрежимо мала по сравнению с t_n). В данном случае, при периодическом круговом обзоре, в промежутки времени между моментами выключения и включения прибора наблюдения цель, находящаяся на границе зоны, очерченной радиусом R_0 , имеет возможность сблизиться с наблюдателем на дальность, меньшую дальности R_0 , на величину

$$\Delta R = V_{ц} t_n. \quad (2.13)$$

Таким образом, если не учитывать очень малые проникновения цели $\pm 0,5 V_{ц} T$, то круговая зона обнаружения может быть разделена на две области, одна из которых имеет радиус R_0 (область, которая обеспечивается техническими возможностями прибора наблюдения), другая $R_{оп}$ (область, которая обеспечивается способом использования прибора). Вторая область характеризуется (в отличие от первой) тем, что цель в нее не может проникнуть необнаруженной, а область, лежащая между R_0 и $R_{оп}$, характеризует область вероятного обнаружения цели, при этом вероятность обнаружения цели на той или иной дистанции в интервале $R_0 - R_{оп}$ будет зависеть от момента входа цели в зону радиуса R_0 по отношению к времени реализации паузы t_n .

Таким образом, в силу влияния ряда причин дальность, на которой может быть установлен контакт с целью, не может считаться постоянной, определенной величиной. Она должна как случайная, неопределенная величина описываться и оцениваться методами теории вероятности.

2.2.2. Распределение дальности действия

Трудности непосредственного и точного определения ожидаемой величины R обусловлены тем, что влияние тех или иных факторов может носить не только достаточно устойчивый, но и часто неустойчивый характер, и поэтому обычно не поддается заблаговременному учету и контролю.

В зависимости от характера своего влияния все факторы, определяющие дальность действия прибора наблюдения, могут быть разделены:

на постоянно действующие;
на медленно меняющиеся;
на быстро меняющиеся;
на случайные (непредвиденные).

При определении дальности действия прибора наблюдения обычно невозможен прямой учет влияния не только непредвиденных событий, но и быстро изменяющихся условий наблюдения, которые вызывают разброс конкретных значений дальности действия прибора относительно ожидаемого ее среднего значения. С другой стороны, постоянно действующие факторы (в силу их стабильности) и медленно меняющиеся могут быть отнесены к числу контролируемых, обуславливающих рассчитываемое среднее значение (математическое ожидание) дальности действия прибора наблюдения.

Поэтому процесс обнаружения следует рассматривать как случайный процесс, а дальность действия средств наблюдения — как случайную величину, закономерности изменения которой должны изучаться с помощью математического аппарата теории вероятности [12, 13, 16].

Из теории вероятности известно, что любая случайная величина, в том числе и дальность действия, будет полностью описана с вероятностной точки зрения, если будет найден ее закон распределения, характеризующийся математическим ожиданием дальности действия m_R (обусловленным влиянием контролируемых факторов) и среднеквадратическим отклонением σ_R (обусловленным влиянием неконтролируемых факторов).

Законом распределения дальности действия называется всякое соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями дальности действия прибора наблюдения и соответствующими вероятностями.

Если провести достаточно массовые испытания, в которых многократно либо цель приближается к прибору наблюдения (например, в случае обнаружения воздушной цели с корабля, берегового или наземного поста), либо прибор наблюдения приближается к цели (например, в случае обнаружения наземной или надводной цели с самолета) и каждый раз фиксируется дальность первого обнаружения, то из большого числа подобных испытаний могут быть построены кривые вероятности обнаружения цели в зависимости от дальности. Обычно интегральная кривая (рис. 2.3, в), характеризующая зависимость $P(R)$ вероятности обнаружения от дальности действия, стремится к нулю на максимальных дальностях и к единице на

минимальных дальностях обнаружения цели. Обнаружение цели всегда более вероятно на некоторых средних дальностях ($R_{\text{ср}}$), чем на больших или малых (рис. 2.3, а, б), так как обнаружение цели на больших дальностях маловероятно в силу недостаточной энергетической эффективности приборов наблюдения, а на малых дальностях обнаружение менее вероятно, поскольку маловероятно, что цель не будет обнаружена, прежде чем она сблизится с прибором

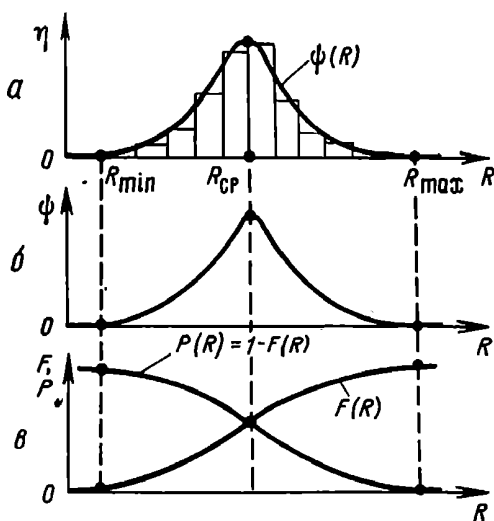


Рис. 2.3. Графики $\Psi(R)$, $P(R)$ и $F(R)$

наблюдения от максимально возможной дальности обнаружения до данной. В большинстве случаев разброс дальностей обнаружения происходит в некотором интервале от R_{min} до R_{max} , характеризующемся определенным законом распределения плотности вероятности $\Psi(R)$.

Из теории вероятности известно, что $F(R)$ есть вероятность типа $P(R \leq)$, т. е. вероятность того, что значение случайной величины (дальность действия), полученное в результате испытания, не превзойдет некоторого ее значения $R=R'$. Следовательно, $F(R)$ характеризует вероятность необнаружения цели до подхода ее на расстояние $R=R'$:

$$P(R \leq) = F(R) = \int_{-\infty}^{R'} \Psi(R) dR \approx \int_{R_{\text{min}}}^{R'} \Psi(R) dR. \quad (2.14)$$

Вероятность же обнаружения цели на дальности не меньше R' может быть найдена как вероятность

$$P(R \geq R') = P(R) = 1 - F(R) = 1 - \int_{-\infty}^{R'} \Psi(R) dR = \\ = \int_{R'}^{\infty} \Psi(R) dR \approx \int_{R'}^{R_{\max}} \Psi(R) dR. \quad (2.15)$$

Для определения основных числовых характеристик m_R , σ_R , необходимых для проведения аналитических расчетов, пользуются формулой

$$m_R = R_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i, \quad (2.16)$$

где n — число испытаний (обнаружений цели);

R_i — значение дальности обнаружения при конкретном испытании.

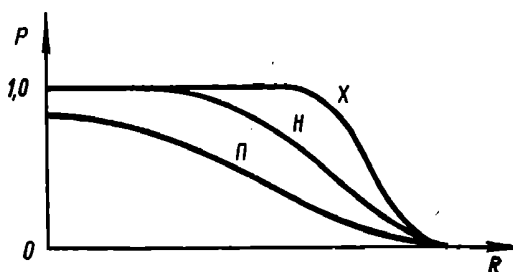


Рис. 2.4. Графики $P(R)$ для хороших X , нормальных H и плохих $П$ условий

При большом количестве испытаний принимают

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - R_{\text{ср}})^2}, \quad (2.17)$$

а при малом

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - R_{\text{ср}})^2}. \quad (2.18)$$

Для достаточно точного определения закона распределения дальности действия прибора наблюдения обычно требуется 400—500 испытаний. Кривые $P(R)$ могут быть по-

строены (рис. 2.4) для каждого класса цели в зависимости от ее величины и характера движения (скорость, высота) и применительно к наиболее характерным условиям наблюдения (например, хорошим — Х, нормальным — Н и плохим — П).

При данной методике испытаний цель с прибором наблюдения сближается при значениях курсового параметра, близких к нулю. Значит, и эти кривые могут быть непосредственно использованы для оценки вероятности обнаружения цели, движущейся относительно прибора наблюдения на курсовом параметре нуль или близком к нулю.

Простейшая методика построения кривых дифференциального и интегрального законов распределения дальности обнаружения приведена в [21].

2.2.3. Типовые законы распределения дальности действия

В некоторых случаях может возникнуть необходимость составления аналитических выражений для оценки вероятности обнаружения цели по статистическому распределению дальности действия прибора наблюдения. Для решения этой задачи необходимо установить математические законы распределения, которыми можно характеризовать реальные распределения дальности действия приборов наблюдения.

Установлено, что если рассматривать обнаружение целей как случайный процесс, осуществляемый в достаточно однородных «типических» условиях, то распределение дальностей обнаружения подчиняется нормальному закону. При типизации условий ограничивается влияние некоторых доминирующих факторов на процесс обнаружения, т. е. предполагается, что в определенном промежутке времени некоторые факторы, влияющие на процесс обнаружения, остаются практически неизменными (например, метеорологические факторы, характер цели, тип прибора наблюдения и т. д.) либо изменяются незначительно в допустимых пределах. Таким образом, у каждой отдельной категории «типических» условий имеются возможности для реализации нормального закона распределения, когда получение того или иного значения дальности действия прибора наблюдения как случайной величины обуславливается воздействием большого числа незначительных по силе своего влияния факторов.

Задача определения зависимостей для оценки вероятности обнаружения цели проще всего решается в случае именно нормального закона (закона Гаусса) с дифференциальной функцией распределения, характеризующей плотность вероятности, следующего вида:

$$\Psi(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} e^{-\frac{(R-m_R)^2}{2\sigma_R^2}} \quad (2.19)$$

В этом случае интегральный закон, характеризующий вероятность необнаружения цели до подхода ее на дальность R , будет иметь вид

$$F(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} \int_{R_{\min}}^R e^{-\frac{(R-m_R)^2}{2\sigma_R^2}} dR. \quad (2.20)$$

Откуда вероятность обнаружения цели на дальности не менее заданного значения R

$$P(R) = 1 - F(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} \int_R^{R_{\max}} e^{-\frac{(R-m_R)^2}{2\sigma_R^2}} dR. \quad (2.21)$$

Полученная функция $P(R)$ может рассматриваться как функция распределения дальности обнаружения цели (функция распределения дальности действия прибора наблюдения). С помощью этой функции может быть оценена вероятность обнаружения цели, проникающей в зону действия прибора наблюдения до дальности $R=d$. Решая уравнение (2.21) через функцию Лапласа Φ [13], получим

$$P(R \geq d) = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi\left(\frac{d-m_R}{\sqrt{2}\sigma_R}\right) \right]. \quad (2.22)$$

Соответственно может быть оценена вероятность того, что значение R будет лежать в пределах изменения дальности от a до b — вероятность обнаружения цели в интервале (a, b)

$$P(a < R < b) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{b-m_R}{\sqrt{2}\sigma_R}\right) - \Phi\left(\frac{a-m_R}{\sqrt{2}\sigma_R}\right) \right]. \quad (2.23)$$

С помощью зависимостей для нормального закона распределения вероятностей можно описывать, например, распределения дальности действия средств (приборов) наблюдения высокой и средней эффективности в «типических» условиях наблюдения.

В условиях, характеризующихся большой неопределенностью, когда нет возможности отнести статистические данные к различным видам типических ситуаций, могут быть использованы аналитические выражения для закона Релея или Максвелла. Эти законы позволяют характеризовать распределения дальности действия приборов наблюдения в более обобщенных условиях, применительно к более широким диапазонам возможных изменений условий наблюдения.

Дифференциальная функция распределения по закону Релея, характеризующая плотность вероятности, имеет вид

$$\Psi(R) = \frac{R}{\sigma_R^2} e^{-\frac{R^2}{2\sigma_R^2}}. \quad (2.24)$$

Рассуждая, как и в случае использования нормального закона, получим следующие соотношения:

$$F(R) = \int_0^R \frac{R}{\sigma_R^2} e^{-\frac{R^2}{2\sigma_R^2}} dR = 1 - e^{-\frac{R^2}{2\sigma_R^2}}; \quad (2.25)$$

$$P(R) = 1 - F(R) = e^{-\frac{R^2}{2\sigma_R^2}}, \text{ т. е. } P(R \geq d) = e^{-\frac{d^2}{2\sigma_R^2}}; \quad (2.26)$$

$$P(a < R < b) = e^{-\frac{a^2}{2\sigma_R^2}} - e^{-\frac{b^2}{2\sigma_R^2}}. \quad (2.27)$$

Это распределение характеризуется одним параметром σ_R , при этом

$$m_R = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_R \approx 1,25\sigma_R,$$

а наименее вероятное значение равно σ_R . Оно более свойственно, например приборам наблюдения низкой или средней эффективности при неблагоприятных физических условиях.

Аналогично могут быть получены выражения для определения вероятности обнаружения в случае использования распределения по закону Максвелла с дифференциальной функцией вида

$$\Psi(R) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{R^2}{\sigma_R^3} e^{-\frac{R^2}{2\sigma_R^2}}. \quad (2.28)$$

При этом

$$m_R = 2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_R,$$

а наимвероятнейшее значение $m_R = \sqrt{2} \sigma_R$.

Кроме указанных для описания распределений дальности действия (обнаружения) могут быть использованы аналитические выражения таких законов:

- усеченный нормальный, который может быть применен при усеченных по краям выборкам статистических данных (для приборов низкой и средней эффективности);
- смещенный закон Релея (для приборов средней и высокой эффективности).

2.2.4. Понятие о распределении дальности скрытия и дальности наблюдения удаляющейся цели

До сих пор мы говорили о распределении дальности обнаружения целей, сближающихся на курсовом параметре, равном нулю, т. е. о распределении $P(R_0)$. Используя аналогичные рассуждения, можно говорить о математическом законе распределения дальности скрытия целей, удаляющихся на курсовом параметре, равном нулю, т. е. о распределении $P(R_c)$. Используя тот или иной закон распределения дальности скрытия, можно определить вероятность скрытия цели или вероятность поддержания с нею контакта.

Следует отметить, что потеря контакта с целью характеризуется меньшей неопределенностью, чем установление его, поэтому всегда $m_{R_0} < m_{R_c}$, $\sigma_{R_0} > \sigma_{R_c}$.

Суммарное распределение дальности обнаружения и дальности скрытия цели характеризует в целом распределение $P(R_n)$ — распределение дальности действия прибора наблюдения как дальности наблюдения за целью (рис. 2.5).

На рис. 2.5 обозначены:

$\Psi(R_0)'$, $\Psi(R_0)''$ и $P(R_0)'$, $P(R_0)''$ — кривые дифференциального и интегрального законов распределения дальностей обнаружения цели соответственно для левого и правого направлений движения цели;

$\Psi(R_c)'$, $\Psi(R_c)''$ и $P(R_c)'$, $P(R_c)''$ — то же, для дальности скрытия наблюдаемой цели;

$\Psi(R_n)$ и $P(R_n)$ — кривые дифференциального и интегрального законов распределения дальности наблюдения цели (дальности действия прибора наблюдения как по обнаруживаемой, так и по сопровождаемой цели).

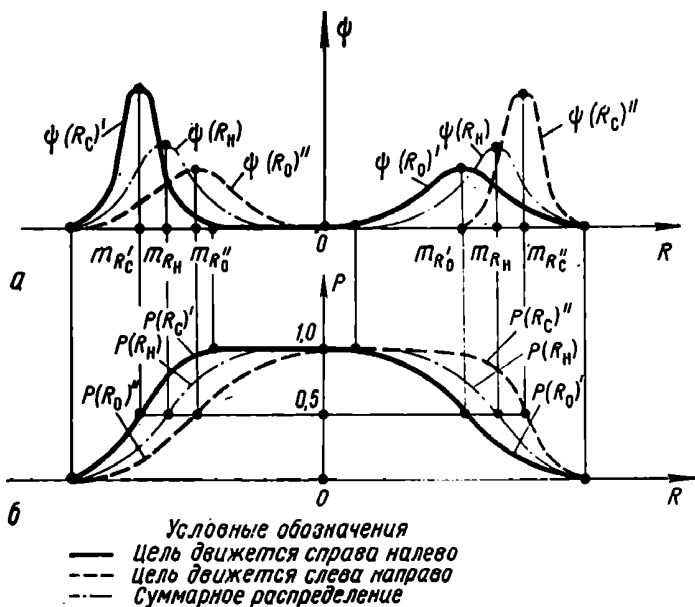


Рис. 2.5. Кривые дифференциального *а* и интегрального *б* законов распределения дальностей: обнаружения R_0 , скрытия R_c и наблюдения R_H цели

При построении и расчете систем наблюдения, при планировании и организации поисковых усилий наибольшее значение имеют вопросы обнаружения целей и оценки ожидаемой дальности действия средств наблюдения по сближающейся цели. Поэтому основное внимание будем уделять далее эффективности обнаружения целей.

2.3. МЕТОДИКА ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ОЖИДАЕМОЙ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ

Знание законов распределения дальностей обнаружения открывает путь для формирования общего методологического подхода к оценке ожидаемой дальности действия средств наблюдения в неопределенных физических условиях.

А это важно знать для экономии сил и средств, выделяемых на поиск и обнаружение целей, так как неопределенность физических условий установления контакта является одним из главных факторов, наиболее сильно влияющих на объем и эффективность поисковых усилий.

2.3.1. Учет неопределенности физических условий установления контакта

Можно считать, что ожидаемая средняя дальность действия (обнаружения) в рассматриваемых конкретных условиях $\bar{R}_k$ есть функция среднестатистического (для данных условий наблюдения) значения дальности обнаружения цели $\bar{R}_0$:

$$\bar{R}_k = k_1 k_2 k_3 \bar{R}_0, \quad (2.29)$$

где k_1 , k_2 и k_3 — коэффициенты, характеризующие состояние соответственно прибора наблюдения, цели и среды.

Если обозначить

$$k = k_1 k_2 k_3, \quad (2.30)$$

то

$$\bar{R}_k = k \bar{R}_0, \quad (2.31)$$

где k — коэффициент качества условий наблюдения;

$\bar{R}_0$ — средняя дальность обнаружения цели (дальность действия прибора наблюдения) при нормальных физических условиях (при нормальном состоянии прибора наблюдения, цели и среды).

Для случая нормальных физических условий

$$k_1 = k_2 = k_3 = 1 \text{ и } \bar{R}_k = \bar{R}_0. \quad (2.32)$$

Величины $\bar{R}_0$ для каждого вида прибора наблюдения по каждому типу цели определяются в ходе специальных испытаний головных образцов и в ходе эксплуатации серийных образцов в условиях, соответствующих нормальному состоянию прибора, цели и среды.

Кроме того, в ходе подобных испытаний выявляется и зависимость дальности обнаружения (действия) от ухудшения или улучшения состояния прибора, цели и среды относительно нормального. Например, для некоторых типов РЛС небольшой мощности величина k_1 может изменяться в пределах от 0 до 1,5 в зависимости от качества работы станции и оператора [5, 46]. При этом значениями 1,5—1,4 можно характеризовать лишь исключительные случаи для отдельных превосходно работающих станций. Значениями 1,3—1,2 можно характеризовать отличное, 1,2—1,1 — хорошее, 1,1—0,9 — нормальное (удовлетворительное), 0,9—0,7 — плохое, 0,7—0,5 — очень плохое состояние станции и обслуживающего ее оператора.

Примерно то же можно сказать о коэффициенте k_2 ,

характеризующем эффективную отражающую поверхность некоторых воздушных и морских целей [2, 3, 11, 23, 30, 54].

На основе опытных данных по обнаружению разнообразных морских и береговых (наземных) объектов при различных метеорологических условиях могут быть чисто условно приняты следующие характерные состояния среды и соответствующие им значения коэффициента k_3 при поиске и обнаружении надводных и низколетящих воздушных целей: отличное — более 1,5; хорошее — 1,5—1,1; нормальное (удовлетворительное) — 1,1—0,9; плохое — 0,9—0,7; очень плохое — 0,7—0,5 и критическое (совсем плохое) — менее 0,5 [23, 54].

На практике для каждой станции может быть выявлена статистическая повторяемость некоторых значений коэффициентов k_1 , k_2 и k_3 . Тогда появится возможность при планировании и расчете поисковых усилий на основе изучения предстоящих условий поиска и обнаружения целей оценивать наиболее вероятные значения каждого из коэффициентов и возможные пределы их изменения. А все это позволит с определенной точностью прогнозировать и основные числовые характеристики законов распределения дальности обнаружения целей средствами наблюдения.

Действительно, за математическое ожидание дальности действия прибора наблюдения m_R (для наиболее вероятных значений k_1 , k_2 и k_3) может быть принята величина $\bar{R}_k$, найденная по статистически или аналитически известной для нормальных условий величине $\bar{R}_0$.

Соответственно за величину разброса дальности действия прибора наблюдения (измеряемую интервалом $\pm 3\sigma_R$) может быть принят диапазон возможных изменений его дальности действия применительно к установленным (найденным) для рассматриваемых условий поиска пределам изменения значений коэффициентов k_1 , k_2 и k_3 .

Итак, на основании изложенного можно записать

$$m_R = \bar{R}_k = k_1'' k_2'' k_3'' \bar{R}_0, \quad (2.33)$$

где k_1'' , k_2'' , k_3'' — наиболее вероятные значения коэффициентов k_1 , k_2 и k_3 для предстоящих условий поиска и обнаружения целей;

$$\sigma_R = \frac{1}{6} (k_1' k_2' k_3' - k_1''' k_2''' k_3''') R_0, \quad (2.34)$$

где k_1' , k_2' , k_3' — наибольшие (наиболее благоприятные) значения коэффициентов k_1 , k_2 и k_3 ;

k_1''' , k_2''' , k_3''' — наименьшие (наименее благоприятные) значения коэффициентов k_1 , k_2 и k_3 .

Для достаточно эффективных средств наблюдения (когда $m_R > \sigma_R$) распределение дальности действия в относительно однородных условиях целесообразно оценивать с помощью нормального или усеченного слева (справа) нормального закона распределения вероятностей. Для малоэффективных (небольшой мощности) средств наблюдения (когда $m_R < \sigma_R$) распределение дальности действия в достаточно обобщенных или более неопределенных условиях поиска можно описывать с помощью закона Релея или усеченного справа закона Релея. В некоторых промежуточных случаях (см. подразд. 2.2.3) целесообразно использовать другие законы распределения вероятностей, например закон Максвелла или смещенный вправо закон Релея.

Имея числовые характеристики m_R и σ_R и выбрав закон распределения, можно оценивать вероятности получения тех или иных значений дальности обнаружения цели (дальности действия прибора наблюдения).

Необходимые для расчета m_R и σ_R исходные величины параметров $R_0, k'_1, k''_1, k'''_1, k'_2, k''_2, k'''_2, k'_3, k''_3, k'''_3$ могут определяться на основе использования как аналитических, так и статистических методов оценки дальности действия средств. Проведение указанных расчетов должно быть обеспечено соответствующими справочными пособиями, которые бы позволяли определять указанные величины для различных типов средств по различным целям и при различных состояниях среды. При этом полезно и построение на основе статистики типовых кривых распределения дальности действия средств (приборов) наблюдения в зависимости от физических условий установления контакта, т. е. для каждого типа прибора наблюдения по различным целям и при различных типовых состояниях прибора и среды [21].

2.3.2. Типовые кривые распределения дальности действия

Рассмотрим типовые кривые распределения дальности действия прибора наблюдения в зависимости от физических условий (рис. 2.6).

Графики $P(R)$ могут быть построены для учета любого фактора, претерпевающего изменения. В этом большое достоинство метода построения типовых кривых. Однако увеличение количества графиков влечет за собой трудности их практического использования. Поэтому целесообразно все факторы разбить на две большие группы, первая из которых характеризует величину цели (малая, средняя,

крупная), вторая — условия наблюдаемости (плохие, нормальные и хорошие). При этом состояние прибора наблюдения считаем нормальным (рис. 2.7).

Такие графики сравнительно легко можно построить для многих достаточно мощных приборов наблюдения и для наиболее простого характера движения цели (на кур-

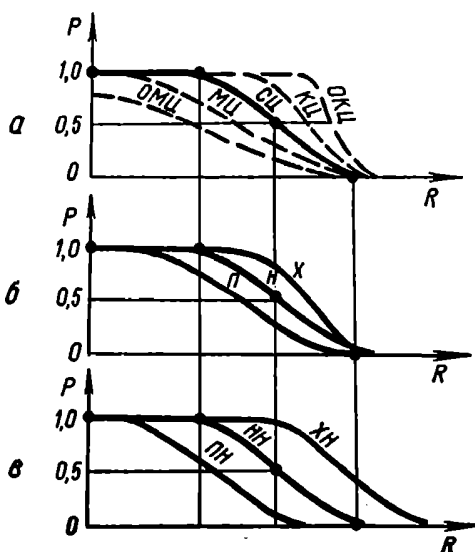


Рис. 2.6. Кривые распределения дальности действия прибора наблюдения в зависимости от величины цели a , состояния прибора b и состояния среды $в$:

цель: ОМЦ — очень малая, МЦ — малая, СЦ — средняя, КЦ — крупная, ОКЦ — очень крупная; состояние прибора: П — плохое, Н — нормальное, Х — хорошее; наблюдаемость: ПН — плохая, НН — нормальная, ХН — хорошая

совом параметре, равном нулю, без применения различных средств маскировки). Такого рода графики и могут рассматриваться в качестве исходных обобщенных статистических характеристик прибора наблюдения. Все промежуточные случаи могут быть реализованы построением соответствующих кривых $P(R)$ путем интерполирования.

Влияние на распределение $P(R)$ активных и пассивных помех, маскирующих покрытий и специального маневри-

рования объектов поиска необходимо рассматривать отдельно, хотя изложенный метод построения кривых $P(R)$ можно применить и для этих ситуаций.

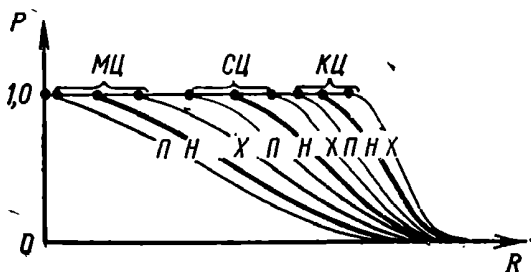


Рис. 2.7. Кривые распределения дальности действия прибора наблюдения в зависимости от величины цели и состояния среды

2.3.3. Вероятностная характеристика зоны действия прибора наблюдения в горизонтальной плоскости

Для определенных условий существует вполне определенное, характеризующее прибор наблюдения в этих условиях, распределение его дальности действия. Зная закон распределения дальности обнаружения цели прибором наблюдения в рассматриваемых условиях, можно аналитически и графически описать его зону действия на горизонтальной плоскости (рис. 2.8) применительно к наиболее характерному способу использования технических средств наблюдения в режиме непрерывного круговогозора [3].

Так, в наиболее характерном для типических условий наблюдения случае нормального закона распределения $P(R)$ за общую зону действия средства (прибора) наблюдения на плоскости с достаточной точностью может быть принята круговая зона, описанная радиусом, равным предельной дальности обнаружения цели:

$$R_n = R_{\max} = m_R + 3\sigma_R. \quad (2.35)$$

При этом за зону достоверного обнаружения цели может быть принята круговая зона, описанная радиусом, равным наименьшей дальности обнаружения:

$$R_m = R_{\min} = m_R - 3\sigma_R. \quad (2.36)$$

Соответственно средняя дальность обнаружения $R_{ср} = m_R$. Поэтому зона действия прибора наблюдения на пло-

скости состоит из зоны вероятного обнаружения (ЗВО), лежащей между R_{Π} и $R_{\text{М}}$, и зоны достоверного обнаружения (ЗДО), лежащей в пределах от 0 до $R_{\text{М}}$.

При таких допущениях, на которых основаны формулы (2.35) и (2.36), из учета выпадает не более 0,3% всех возможных случаев. Для более точных расчетов за глубину ЗВО может быть принята величина $\pm 4\sigma_R$ или да-

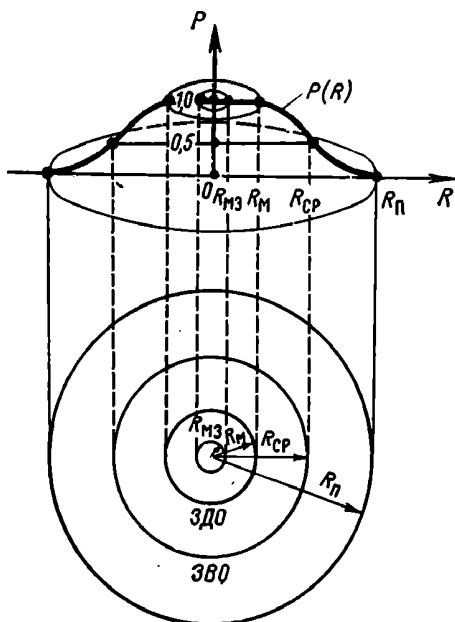


Рис. 2.8. Вероятностная характеристика зоны действия прибора наблюдения в горизонтальной плоскости

же $\pm 5\sigma_R$. Однако такой выбор должен быть согласован по величине R_{Π} с максимально возможной для данного прибора наблюдения дальностью обнаружения цели.

Для приборов наблюдения низкой эффективности зоны достоверного обнаружения может не быть совсем. Это говорит о возможности незаметного подхода цели к наблюдателю. Для некоторых видов средств при характеристике их зон действия необходимо учитывать также наличие на малых дистанциях, так называемой «мертвой» (непросматриваемой) зоны, ограниченной радиусом $R_{\text{мз}}$, для которой понятие распределения дальности действия (обнаружения)

теряет физический смысл, в связи с чем на кривой распределения дальности действия $P(R)$ необходимо отметить в пределах R_m уменьшение роста вероятности обнаружения цели до нуля.

Аналогично могут быть найдены зависимости для характеристики зоны действия средств (приборов) наблюдения и при других законах распределения их дальности действия. Для характеристики возможности обнаружения следует, кроме того, использовать и график функции $\Psi(R)$ (см. рис. 2.3, б), показывающий интенсивность обнаружения на различных дистанциях в интервале от R_n до R_m . Например, наиболее интенсивно обнаруживаются цели на удалениях $R=R_{ср}=m_R$ при нормальном и $R=\sigma_R$ при релеевском распределениях.

Приведенный способ представления зоны действия средств наблюдения на плоскости позволяет наглядно судить о возможностях обнаружения целей, движущихся на курсовых параметрах, равных или близких к нулю, при использовании средств в режиме непрерывного кругового обзора.

В ряде случаев при НСО для такой же скорости обзора, как и при НКО, можно считать, что в секторной зоне действия прибора наблюдения имеют место те же закономерности обнаружения целей, что и при НКО, см. формулы (2.12). При ПКО и ПСО значения R_n , R_m и $R_{ср}$ необходимо согласно формуле (2.13) уменьшить на величину $\Delta R = V_{цл} t_n$.

2.3.4. Учет высоты (глубины) движения цели. Зона обнаружения в пространстве

Дальность обнаружения воздушных (подводных) целей может, как известно, в большой мере зависеть соответственно от высоты (глубины) расположения их траекторий движения относительно наблюдателя.

Тщательный учет всех возможных конкретных высот (глубин) при вероятностной оценке ожидаемой дальности обнаружения воздушных (подводных) целей очень затруднителен, да и порой практически не нужен.

В практике обычных расчетов часто бывает достаточным знание возможностей обнаружения воздушных целей на больших, средних и малых высотах, а подводных целей в приповерхностном или придонном слое либо в толще моря. В связи с этим, например, для каждого типа воздушной цели могут быть собраны статистические данные

и определены распределения дальностей обнаружения соответственно на больших, средних и малых высотах применяемой для этого радиолокационной станции.

На основании полученных данных можно построить соответствующие кривые распределения дальности обнаружения цели и плоскостные зоны дальности действия РЛС для указанных категорий высот, а затем на их основе охарактеризовать в вероятностном отношении и зону действия РЛС в вертикальной плоскости (рис. 2.9).

Подобные пространственные зоны, как и зоны действия РЛС на плоскости (при обнаружении наземных и мор-

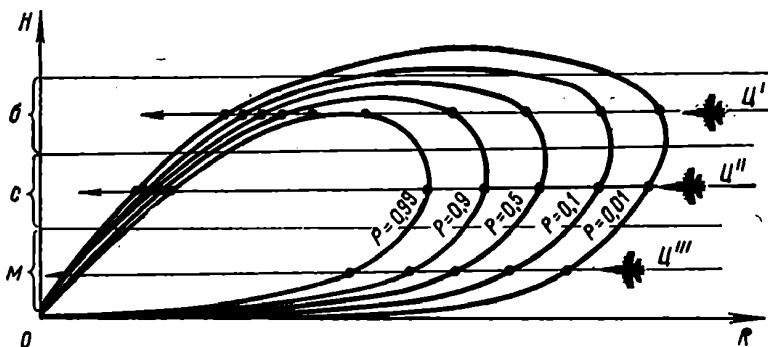


Рис. 2.9. Вероятностная характеристика зоны действия РЛС в вертикальной плоскости:

высоты: m — малые, c — средние, b — большие

ских целей), могут быть построены соответственно для хороших, нормальных и плохих условий и затем использованы как для определения возможных минимальных и максимальных дальностей действия (обнаружения) и дальностей действия РЛС при тех или иных заданных вероятностях обнаружения цели, так и для решения обратных задач по оценке ожидаемых вероятностей обнаружения целей на тех или иных дистанциях и при тех или иных высотах их полета.

При необходимости, например, на основе использования различных цветов могут быть составлены подобного рода комплексные многоцветные диаграммы обнаружения различных по величине целей в тех или иных рассматриваемых условиях. Тогда подобные семейства диаграмм будут содержать синтезированную информацию о возможных дальностях действия РЛС по основным видам целей и поз-

волят создать наглядное представление о зоне действия РЛС по различным целям в различных условиях.

При отсутствии достаточного количества опытных статистических данных по дальности обнаружения различных по величине целей на различных высотах может быть использован аналитический метод получения данных для построения таких диаграмм [58]. Оригинальная методика построения подобных диаграмм видимости для обеспечения раннего обнаружения целей приведена в [35].

Аналогичный подход и подобные методы могут быть рекомендованы (при наличии достаточного количества статистических или расчетных данных по дальностям обнаружения подводных целей на различных глубинах) и для вероятностной характеристики зон действия гидроакустических станций в вертикальной плоскости с учетом соответствующих условий гидроакустической наблюдаемости целей в толще воды. При этом для аналитического способа получения данных может быть рекомендована, например, общая методика [37].

Изложенные в главе методы могут быть использованы и при оценке ожидаемой дальности действия (обнаружения) в условиях противодействия противника, если будут найдены соответствующие характеристики эффективности средств наблюдения в условиях помех. Принцип учета их влияния ясен. Они всегда понижают эффективность средств, увеличивают неопределенность акта обнаружения, что проявляется в уменьшении средней дальности действия (обнаружения) и в увеличении ее разброса.

Специальные методы учета влияния помех на дальность действия (обнаружения) рассматриваются в [10, 11, 15, 23, 26, 30, 47], а в [15], например, отношение дальности действия РЛС в условиях помех $R_{\text{пх}}$ к дальности действия при отсутствии помех R оценивается через отношение спектральных плотностей помехи $N_{\text{пх}}$ и собственных шумов приемника РЛС N :

$$\frac{R_{\text{пх}}}{R} = \frac{1}{\sqrt[4]{1 + \frac{N_{\text{пх}}}{N}}} . \quad (2.37)$$

Так может быть оценено, например, влияние маскирующих помех на величину ожидаемой средней дальности действия $R = \bar{R} = m_R$, а воздействие на величину возможного ее разброса $6\sigma_R$ может быть ориентировочно оценено в обратном соотношении. Действительно, если, например, от воздействия маскирующих помех величина ожидаемой сред-

ней дальности действия уменьшается (рис. 2.10) в два раза (от $\bar{R}' = m'_R$ до $\bar{R}'' = m''_R$), то величина разброса дальности действия, наоборот, увеличивается примерно вдвое (от $6\sigma'_R$ до $6\sigma''_R$).

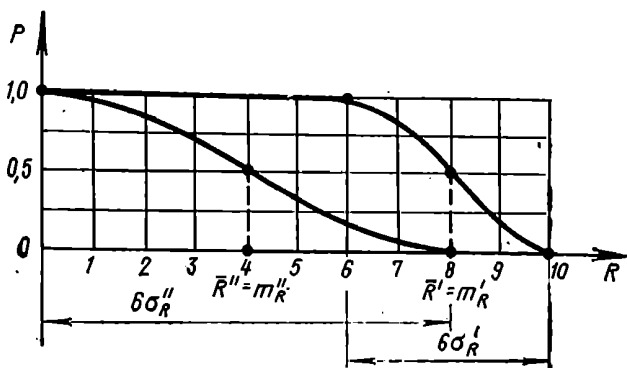


Рис. 2.10. Распределение дальности действия в условиях маскирующих помех

Особое место занимают вопросы оценки ожидаемой дальности действия средств маловысотной и загоризонтной радиолокации, которые подробно изложены в [9, 38].

Глава 3

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТАНОВЛЕНИЯ ПРИБОРНЫХ КОНТАКТОВ

В методологическом отношении проводимое в главе 3 специальное рассмотрение вопроса о приборных контактах имеет определяющее значение для характеристики эффективности обнаружения целей в зонах действия средств наблюдения, используемых как в стационарных, так и нестационарных системах наблюдения в неопределенных и относительно неопределенных физических условиях поиска и обнаружения целей.

Излагаемый здесь методологический подход основан на использовании приемов и методов вероятностно-статистического описания ожидаемых дальностей действия (обнаружения) и ожидаемых вероятностей установления приборных контактов, характеризующих возможность обнаружения целей в зонах действия средств наблюдения в тех или иных условиях [3, 9, 18, 20, 25, 32, 39, 47].

3.1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ УСТАНОВЛЕНИЯ ПРИБОРНЫХ КОНТАКТОВ

Кроме рассмотренных в главе 2 характеристик, методы вероятностной оценки ожидаемой дальности обнаружения целей с помощью статистических распределений дальности действия средств наблюдения дают возможность определять и такие характеристики, которые позволяют математически описывать процессы и акты установления приборных контактов в любых ситуациях поиска и обнаружения целей. Это, например, мгновенная и накапливающаяся вероятности обнаружения целей [3, 18, 20, 25, 32, 39].

3.1.1. Мгновенные вероятности обнаружения цели

В зависимости от конструктивных особенностей средств наблюдения и способов их использования обследование пространства в процессе проведения поиска может быть непрерывным во времени или состоять из отдельных мгновенных актов [3, 18, 20, 25, 32]. Обследование следует отнести к непрерывному процессу, если наблюдатель неизменно фиксирует свой «взгляд» на некоторой части пространства или если наблюдение ведется с помощью средств ненаправленного действия. А если средства направленного действия используются для обследования пространства в пределах некоторого угла, значительно превышающего ширину диаграммы направленности этих средств, то его следует рассматривать как обследование, состоящее из ряда отдельных мгновенных актов. При этом промежутки времени, через которые производятся мгновенные акты наблюдения, будут зависеть от величины обследуемого угла и угловой скорости обследования. Иногда эти промежутки могут быть настолько малы, что обследование можно считать непрерывным. В общем же случае решение о том, к какому способу отнести обследование, зависит от того, какой из них обеспечивает наибольшую точность описания процесса установления приборного контакта.

В том случае, когда обследование состоит из отдельных актов, важным критерием для оценки эффективности средств наблюдения при поиске является мгновенная (элементарная) вероятность g обнаружения цели на данной дальности путем одного мгновенного наблюдения.

Если в процессе проведения поиска осуществляется непрерывное обследование, важным критерием для оценки эффективности средств наблюдения является мгновенная (элементарная) вероятность γdt обнаружения в течение очень короткого промежутка времени dt . При этом величина γ является интенсивностью (мгновенной плотностью вероятности) числа обнаружений.

Рассмотренные характеристики являются статистическими, т. е. могут быть найдены из опыта [3]. Для этого используют формулы

$$g = \frac{1}{n}, \quad \gamma = \frac{1}{t}, \quad (3.1)$$

где $\bar{n}$ — математическое ожидание числа обзоров, за которое обеспечивается обнаружение цели прибором наблюдения;

$\bar{t}$ — математическое ожидание времени, за которое обеспечивается обнаружение цели с момента включения прибора наблюдения;

$$\bar{n} = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m n_l, \quad \bar{t} = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m t_l. \quad (3.2)$$

Возможность применения величин g и γ для количественной характеристики эффективности средств наблюдения как приборов обнаружения обеспечивается возможностью определения на практике статистических распределений дальности обнаружения целей и определения на их основе зависимостей $g(R)$ и $\gamma(R)$ для рассматриваемых типовых условий наблюдения (рис. 3.1).

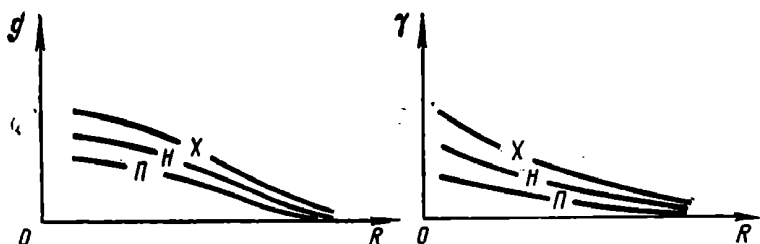


Рис. 3.1. Графики $g(R)$ и $\gamma(R)$ для хороших X , нормальных H и плохих Π условий наблюдения

Кроме этих двух характеристик [3, 20, 25, 32] можно использовать и третью, которая называется интенсивностью (мгновенной плотностью вероятности) обнаружения цели по дальности [39]:

$$f = -\frac{d\varphi}{dR}, \quad (3.3)$$

где $\varphi = \varphi(R)$ — потенциал обнаружения, который находится из уравнения

$$P = P(R) = 1 - e^{-\varphi}. \quad (3.4)$$

Отсюда

$$\varphi = -\ln(1 - P) = \ln \frac{1}{1 - P(R)}. \quad (3.5)$$

Таким образом,

$$f = -\frac{d\varphi}{dR} = -\frac{P'(R)}{1 - P(R)} = \frac{\Psi(R)}{1 - P(R)}. \quad (3.6)$$

Таким образом, зная закон распределения $P(R)$, можно найти аналитическое выражение для f . Например, для нормального закона распределения $P(R)$ значение f [3] можно определить по формуле

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} e^{-\frac{(R-m_R)^2}{2\sigma_R^2}} \cdot \frac{1}{2} \left[1 + \Phi\left(\frac{R-m_R}{\sqrt{2}\sigma_R}\right) \right] \quad (3.7)$$

Кривые $P(R)$, $\varphi(R)$ и $f(R)$ показаны на рис. 3.2.

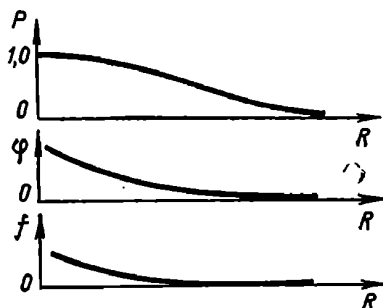


Рис. 3.2. Сравнительные графики функций $P(R)$, $\varphi(R)$ и $f(R)$

Пример 3.1. Определить значения f для дистанций 0, 10, 20, 30, 40, 50 и 60 км для прибора наблюдения, дальность действия (обнаружения) которого характеризуется нормальным законом распределения с параметрами $m_R = \sigma_R = 20$ км.

Решение. По формуле (3.7), используя таблицы для e^{-x} и для функции Лапласа [13], рассчитываем значения f для заданных расстояний; данные сводим в таблицу.

R	0	10	20	30	40	50	60
f	0,075	0,057	0,04	0,025	0,014	0,008	0,003

Например, величина f_1 для $R = 0$ определяется

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{\sqrt{6,28} \cdot 20} e^{-\frac{400}{2 \cdot 400}} = \frac{e^{-0,5}}{25,6 [1 + \Phi(-0,71)]} = \\ &= \frac{0,6}{25,6 (1 - 0,68)} = 0,075 \left[\frac{1}{\text{км}} \right]. \end{aligned}$$

Общий случай зависимости $f(R)$ для различных приборов наблюдения представлен на рис. 3.3, из которого видно, что для приборов наблюдения невысокой эффективности даже при нахождении цели над наблюдателем или под наблюдателем вероятность ее обнаружения будет меньше единицы. А для наиболее эффективных приборов наблюдения достоверное обнаружение происходит на некоторой дальности R_d .

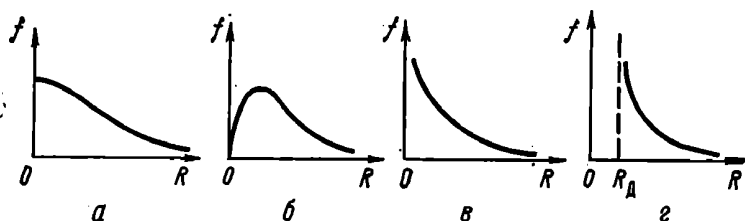


Рис. 3.3. Зависимость $f(R)$ для приборов наблюдения невысокой эффективности а, с «мертвой» зоной б, относительно высокой эффективности в и наиболее эффективных г

Между рассмотренными характеристиками существует определенная связь [3], которая выражается следующими формулами:

$$\gamma = fV_{\text{ц}}; \quad (3.8)$$

$$g = 1 - e^{-\gamma T}, \quad (3.9)$$

где T — период обзора;

$$f = \frac{\gamma}{V_{\text{ц}}} = \frac{1}{V_{\text{ц}}T} \ln \frac{1}{1-g}. \quad (3.10)$$

3.1.2. Накапливающиеся вероятности обнаружения цели

Эффективность процесса установления контакта с целью за то или иное время может быть оценена с помощью накапливающихся (нарастающих) вероятностей обнаружения цели [3, 18, 20, 25, 32]. Рассмотрим данный вопрос поэтапно для различных условий наблюдения и различного характера поведения цели [3, 20].

Оценка ожидаемой вероятности обнаружения неподвижной цели

а) Неизменяющиеся условия наблюдения ($g = \text{const}$, $\gamma = \text{const}$).

Если обследование состоит из отдельных актов, т. е. используется прибор наблюдения дискретного действия, и

обнаружение цели в каждом из них представляет собой независимое событие, вероятность $P(n)$ обнаружения цели хотя бы один раз при n мгновенных наблюдениях можно найти в соответствии с теоремой о повторении независимых опытов по формуле

$$P(n) = 1 - (1 - g)^n. \quad (3.11)$$

Из этой формулы вытекает важный для практики вывод: когда физические условия, в которых производится поиск, обеспечивают некоторую вероятность g обнаружения при одном мгновенном наблюдении, то, как бы она мала ни была, вероятность $P(n)$ может быть сколь угодно близка к единице при достаточно большом n , т. е. событие, заключающееся в обнаружении цели, почти наверняка наступит.

Когда обследование производится непрерывно в течение времени t при неизменных физических условиях, веро-

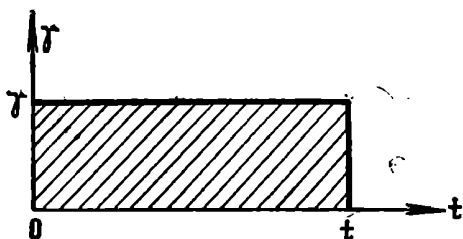


Рис. 3.4. График зависимости $\gamma(t)$ для неизменяющихся условий наблюдения

ятность $P(t)$ обнаружения цели за время t определяется следующей формулой:

$$P(t) = 1 - e^{-\gamma t}. \quad (3.12)$$

Из формулы (3.12) видно, что, имея значение величины γ и задаваясь временем наблюдения t , мы можем рассчитать вероятность обнаружения цели при неизменяющихся условиях наблюдения (в частности, при $R = \text{const}$).

При рассмотрении изложенного выше было принято, что цель находится на определенном расстоянии от прибора наблюдения, которое с течением времени не меняется, при этом предполагалось, что γ также не меняется с течением времени t (рис. 3.4).

Из рис. 3.4 видно, что величина γt , стоящая в показателе степени в выражении (3.12), есть площадь заштрихованного прямоугольника. Следовательно, как бы мала

ни была величина γ , теоретически можно всегда выбрать такое время наблюдения t , что площадь прямоугольника γt будет очень большой, а поэтому и вероятность обнаружения $P(t)$ будет близкой к единице.

б) Изменяющиеся условия наблюдения ($g = \text{var}$, $\gamma = \text{var}$).

Изменяющиеся значения мгновенных вероятностей обозначим через g_i и $\gamma_i dt$, где g_i — элементарная вероятность обнаружения цели для i -го мгновенного наблюдения, а γ_i — плотность вероятности обнаружения цели, изменяющаяся со временем. Формулы для расчета вероятностей обнаружения в данном случае будут иметь вид:

— при дискретном обследовании (обзоре)

$$P(n) = 1 - (1 - g_1)(1 - g_2) \dots (1 - g_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - g_i); \quad (3.13)$$

— при непрерывном обследовании (обзоре)

$$P(t) = 1 - e^{-\int_0^t \gamma_i dt} = 1 - \exp \left[- \int_0^t \gamma_i dt \right]. \quad (3.14)$$

Оценка ожидаемой вероятности обнаружения подвижной цели

а) Неизменяющиеся условия наблюдения ($g = \text{const}$, $\gamma = \text{const}$).

Для быстро движущихся целей можно считать, что за время движения цели в зоне действия прибора наблюдения, ограниченной предельной дальностью обнаружения цели R_n , не происходит существенного изменения физических условий наблюдения, а соответственно и не происходит связанных с этим изменений величин g и γ . Такое допущение в ряде случаев (например, при обнаружении воздушных целей с корабля или кораблей с самолетов) вполне допустимо и даже закономерно.

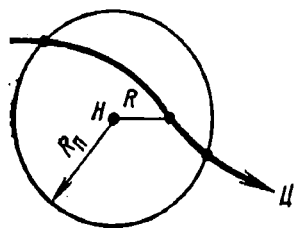


Рис. 3.5. Схема траектории движения цели в зоне действия прибора (станции)

Поэтому можно считать (рис. 3.5), что в зоне, ограниченной радиусом R_n , изменение величин g и γ будет обусловлено лишь перемещением цели в зоне действия прибора наблюдения (изменением ее относительного местоположения).

Таким образом, g и γ являются функциями текущей дальности до цели r , обозначаемой внутри зоны действия прибора наблюдения R , т. е. $g_i = g_i(r) = g_i(R)$ и $\gamma_i = \gamma_i(r) = \gamma_i(R)$. При этом $P(n)$ и $P(t)$ могут быть определены по формулам:

$$P(n) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - g_i(R)]; \quad (3.15)$$

$$P(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t \gamma_i(R) dt \right]. \quad (3.16)$$

Значения $g_i(R)$ и $\gamma_i(R)$ могут быть выбраны из графиков (рис. 3.1).

б) Изменяющиеся условия наблюдения ($g = \text{var}$, $\gamma = \text{var}$).

Ситуация, при которой g и γ есть функции не только текущей дальности до цели R , но и текущего астрономического времени τ (так как с течением его меняются условия наблюдения, вызывающие в свою очередь изменение g и γ), является наиболее общей. В этом случае $g_i = g_i(R, \tau)$ и $\gamma_i = \gamma_i(R, \tau)$ и формулы для определения $P(n)$ и $P(t)$ выглядят следующим образом:

$$P(n) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - g_i(R, \tau)]; \quad (3.17)$$

$$P(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t \gamma_i(R, \tau) dt \right]. \quad (3.18)$$

Значения $g_i(R, \tau)$ и $\gamma_i(R, \tau)$ выбираются из таблиц или из графиков (рис. 3.1) применительно к соответствующим условиям, характерным для каждого i -го наблюдения. Однако для прямого расчета величины $P(t)$ по формулам (3.16) и (3.18) необходимо найти аналитические выражения для законов изменения $\gamma_i(R)$ и $\gamma_i(R, \tau)$.

3.1.3. Методы определения аналитических зависимостей для закона установления приборного контакта

Воспользуемся общей методикой [3].

Под законом установления приборного контакта понимается функция $\gamma_i = \gamma(R, t) = \gamma_i(R)$ для неизменяющихся и $\gamma_i = \gamma(R, t) = \gamma_i(R, \tau)$ для изменяющихся условий на-

блюдения, преобразованная применительно к заданному (известному) закону изменения текущего расстояния (в нашем случае $r \equiv R$) во времени t в функцию одного аргумента, т. е. $\gamma = \gamma(t)$.

Функция $\gamma = \gamma(t)$, как и производящая ее функция $\gamma = \gamma_i = \gamma(R, t)$, зависит (но не явно) от закона изменения во времени t текущего расстояния R и закона обнаружения цели $\gamma = \gamma(R)$.

Чаще всего аналитически функция $\gamma = \gamma(R)$ аппроксимируется линейной, квадратичной или кубической зависимостью. Например,

$$\gamma = \gamma(R) = \gamma'_1 - \frac{\gamma'_1}{R_n} R; \quad (3.19)$$

$$\gamma = \gamma(R) = \frac{kh}{R^2}, \quad (3.20)$$

где k — постоянный коэффициент, который, например, для РЛС, установленной на самолете, будет зависеть от эффективности РЛС, скорости полета, высоты полета (h) и других физических параметров.

Определим теперь аналитическое выражение для закона изменения расстояния между целью и прибором наблюдения. Наиболее характерным является случай, когда цель движется с постоянной скоростью, имея курсовой параметр $\Pi \neq 0$. Под курсовым параметром Π понимается кратчайшее расстояние между прибором наблюдения и линией относительного перемещения цели.

При $\Pi = 0$ (при постоянстве скоростей цели и наблюдателя) скорость изменения расстояния будет неизменной и закон изменения расстояния может быть выражен уравнением

$$R = R_n - V_c t, \quad (3.21)$$

где V_c — скорость сближения, определяемая формулой (1.3).

При $\Pi \neq 0$ закон изменения расстояния будет иметь вид (рис. 3.6)

$$R^2 = x^2 + y^2 = x^2 + V_0^2 t^2, \quad (3.22)$$

где V_0 — скорость относительного перемещения цели, определяемая формулой (1.4).

Чтобы найти закон установления приборного контакта, необходимо решить систему уравнений, характеризующих закон обнаружения $\gamma = \gamma(R)$ и закон изменения расстояния между целью и прибором наблюдения.

Рассмотрим характерные случаи при $\Pi=0$.

1. Закон изменения расстояния определяется выражением (3.21), а закон обнаружения — выражением (3.19).

В трехмерной системе координат (R, t, γ) эти уравнения будут плоскостями, а их пересечение даст прямую линию $R_{\Pi}t'_1$ (рис. 3.7).

Аналитическое выражение $\gamma = \gamma(R, t)$ определяется прямой $R_{\Pi}t'_1$, которая записывается в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R &= R_{\Pi} - V_c t; \\ \gamma &= \gamma'_1 - \frac{\gamma'_1}{R_{\Pi}} R. \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Исключая из уравнений R , получим проекцию линии $R_{\Pi}t'_1$ на плоскость $tO\gamma$, т. е. уравнение для $\gamma = \gamma(t)$:

$$\gamma = \gamma(t) = \frac{\gamma'_1}{R_{\Pi}} V_c t. \quad (3.24)$$

Уравнение (3.24) и дает искомую функциональную зависимость $\gamma = \gamma(t)$.

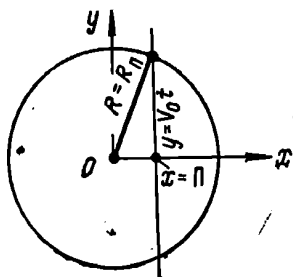


Рис. 3.6. Схема прохода (пролета) цели через зону действия прибора (станции)

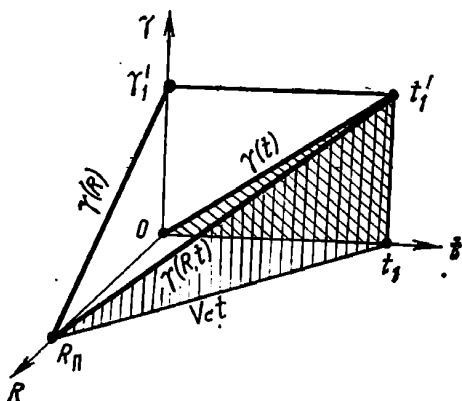


Рис. 3.7. График изменения величины $\gamma(t)$ в зависимости от функции $\gamma(R)$, заданной уравнением (3.19), при $V_c = \text{const}$

2. При таком же законе изменения расстояния, как и в первом случае, функция $\gamma = \gamma(R)$ отличается от прямой линии (например, кривая второго или третьего порядка).

В этом случае система уравнений

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \gamma(R); \\ t &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

представляет собой цилиндрическую поверхность с образующей, параллельной оси t .

Полагаем, что скорость изменения расстояния в течение всего времени наблюдения остается неизменной. Тогда уравнение движения цели будет описываться выражением (3.21). Плоскость, проходящая через линию $R_{\Pi}t_1$ параллельно оси γ , будет описываться системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R &= R_{\Pi} - V_c t; \\ \gamma &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

Пересечение плоскостей, описываемых системами (3.25) и (3.26), даст пространственную кривую $\gamma = \gamma(R, t)$

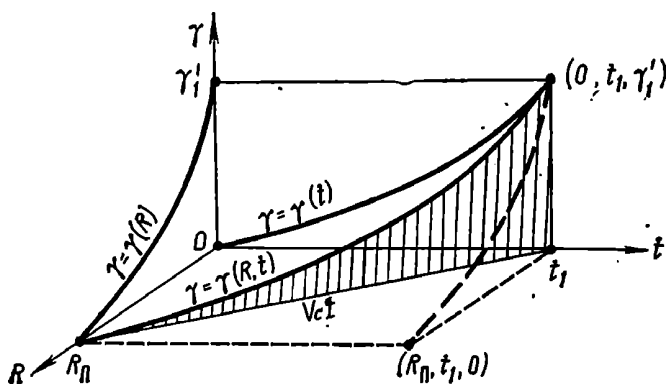


Рис. 3.8. График изменения величины $\gamma(t)$ в зависимости от функции $\gamma(R)$, заданной уравнением (3.20), при $V_c = \text{const}$

(рис. 3.8), проекция которой $\gamma = \gamma(t)$ на координатную плоскость $tO\gamma$ может быть получена исключением из этих уравнений переменной R . Например, функция $\gamma = \gamma(R)$ определяется выражением (3.20).

Система уравнений (3.20) и (3.21) представляет собой линию пересечения цилиндрической поверхности плоскостью, параллельной оси $O\gamma$. Исключая из этих уравнений переменную R , получим проекцию линии пересечения двух поверхностей на координатную плоскость $tO\gamma$

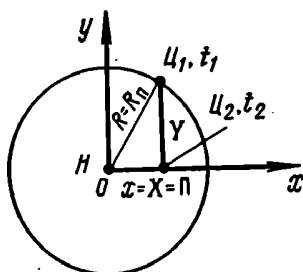
$$\gamma = \gamma(t) = \frac{kh}{(R_{\Pi} - V_c t)^2}. \quad (3.27)$$

Теперь рассмотрим более общий случай, когда $\Pi \neq 0$.

3. Перемещение цели (рис. 3.9) от точки ζ_1 до ζ_2 происходит со скоростью V_0 в течение времени

$$t = t_2 - t_1 = \frac{Y}{V_0} = \frac{\sqrt{R^2 - \Pi^2}}{V_0}.$$

Рис. 3.9. Схема изменения расстояния до цели при ее перемещении в зоне действия прибора (станции)



В этом случае уравнение (3.22) движения цели примет вид

$$R^2 = \Pi^2 + V_0^2 t^2 = \Pi^2 + V_0^2 (t_2 - t_1)^2. \quad (3.28)$$

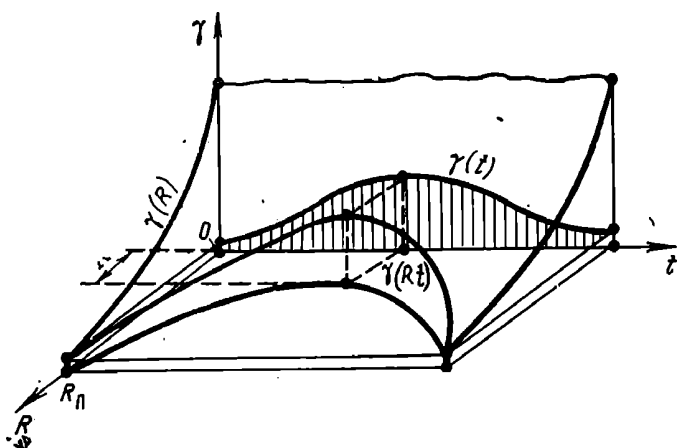


Рис. 3.10. Определение зависимости $\gamma(t)$ на основе зависимости $\gamma(R)$ при переменном значении V_0

Допустим, что функция $\gamma = \gamma(R)$ определяется выражением (3.20).

В трехмерном пространстве R, t, γ уравнением (3.28) задается гиперболический цилиндр с образующей, параллельной оси Oy , а уравнением (3.20) — цилиндрическая поверхность с образующей, параллельной оси Ot .

Решая уравнения (3.20) и (3.28) совместно и исключая переменную R , получим проекцию линии пересечения этих поверхностей на координатную плоскость $tO\gamma$, т. е. функцию $\gamma=\gamma(t)$ (рис. 3.10):

$$\gamma=\gamma(t)=\frac{kh}{\sqrt{(\Pi^2+V_0^2t^2)^3}}=kh(\Pi^2+V_0^2t^2)^{-\frac{3}{2}}. \quad (3.29)$$

3.2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛИ, ДВИЖУЩЕЙСЯ НА КУРСОВОМ ПАРАМЕТРЕ, ОТЛИЧНОМ ОТ НУЛЯ

Кроме рассмотренных распределений дальности действия (обнаружения) цели, движущейся на курсовом параметре, равном или близком к нулю, важное значение для оценки вероятностей установления приборных контактов с целями имеют также распределения боковой и истинной дальности обнаружения цели, движущейся относительно наблюдателя на курсовом параметре, отличном от нуля [3, 25, 32].

3.2.1. Распределение боковой дальности обнаружения

Пусть траектория относительного перемещения цели параллельна оси y (рис. 3.9). Тогда цель, входящая в зону действия прибора наблюдения, ограниченную максимально возможной дальностью обнаружения этой цели $R=R_{\Pi}$, может иметь значения курсового параметра X , лежащие в пределах от 0 до R_{Π} . Весь интервал изменения этой величины может быть охарактеризован определенным распределением величины X , которое называется распределением расстояния относительного траверза (боковой дальности) $P(X)$.

Могут быть два характерных случая:

— дальность действия прибора наблюдения известна (случай определенной дальности), т. е. дальность действия (обнаружения) характеризуется достоверным значением ($R=R_{\Pi}$);

— дальность действия прибора наблюдения не известна, а задана своим распределением (случай неопределенной дальности), за дальность действия (обнаружения) должно быть принято ее максимально возможное значение ($R=R_{\Pi}$).

Рассмотрим отдельно эти два случая для непрерывного и дискретного наблюдения.

1. Дальность действия прибора наблюдения известна ($R=R_d$).

а) Прибор наблюдения непрерывного действия. Здесь $P(X)=1$ при $-R_d \leq X \leq R_d$, $P(X)=0$ при $-R_d > X > R_d$ (рис. 3.11).

б) Прибор наблюдения дискретного действия.

В этом случае вероятность обнаружения цели будет зависеть не только от того, попала цель в зону действия прибора наблюдения или нет, но и от характера движения цели (в частности, от ее скорости) и способа использования самого прибора наблюдения (например, периода дис-

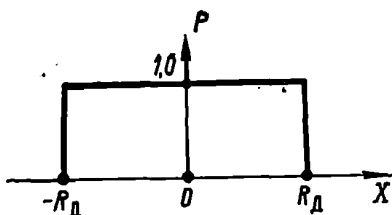


Рис. 3.11. График $P(X)$ при $R = R_d$ и непрерывном наблюдении

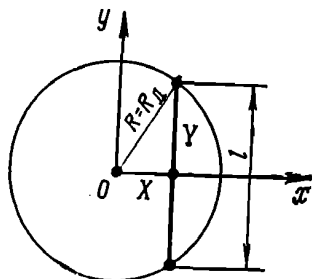


Рис. 3.12. К определению длины пути цели в зоне действия прибора (станции)

кретизации T). Исходя из предположения, что $V_0 = \text{const}$ (рис. 3.12):

$$P(X) = \frac{l}{V_0 T} \quad (3.30)$$

(при условии, что $l \leq V_0 T$).

После ряда преобразований

$$P(X) = \frac{2Y}{V_0 T} = \frac{2\sqrt{R^2 - X^2}}{V_0 T}.$$

Допустим, $P(X)=1$ достигается при значении $X=X_d$. Тогда

$$\begin{aligned} V_0 T &= 2\sqrt{R^2 - X_d^2}, \\ X_d &= \sqrt{R^2 - (0,5V_0 T)^2}. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Анализируя формулы (3.30) и (3.31), можно построить кривые распределения боковой дальности обнаружения цели в интервале действия прибора наблюдения $\pm R_d$.

Если подкоренное выражение формулы (3.31) меньше нуля, то ни при каком значении X не будет достигнуто

равенство $P(X)=1$ (рис. 3.13, а). В этом случае для определения $P(X)$ используется формула (3.30).

Если подкоренное выражение равно нулю, то при $X=0$ $P(X)=1$ (рис. 3.13, б).

Если подкоренное выражение больше нуля, то формула (3.31) дает границы изменения X от $-X_d$ до $+X_d$, в пределах которого обеспечивается достоверное обнаружение цели (рис. 3.13, в).

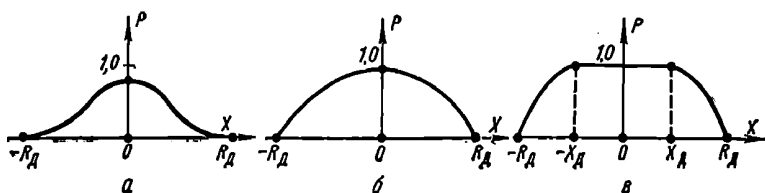


Рис. 3.13. Графики $P(X)$ при $R = R_d$ и дискретном наблюдении:

а — $l_{\max} < V_0 T$; б — $l_{\max} = V_0 T$; в — $l_{\max} > V_0 T$

2. Дальность действия прибора наблюдения не известна ($R=R_n$).

Для построения кривой распределения боковой дальности обнаружения используем графический метод (рис. 3.14).

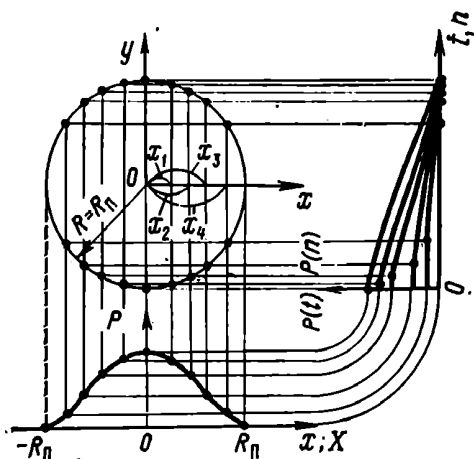


Рис. 3.14. Схема построения кривой $P(x)$

При прохождении цели через зону действия прибора наблюдения определенным курсом (будем считать, что он параллелен оси y) будет происходить накопление вероятности обнаружения цели в соответствии с формулами (3.15) и (3.16). Значение вероятности обнаружения в случае дискретного и непрерывного наблюдения будет зависеть от длины участка пути цели, находящегося в пределах зоны действия прибора наблюдения, которая в свою очередь зависит от величины курсового параметра, т. е. вероятность обнаружения P зависит от боковой дальности X . Эта зависимость и есть распределение боковой дальности обнаружения $P(X)$.

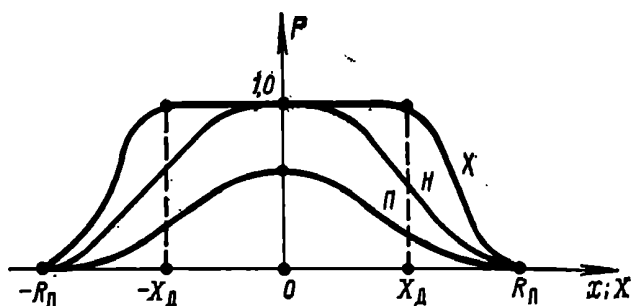


Рис. 3.15. Графики $P(X)$ для хороших X , нормальных H и плохих P условий

Как и при описании распределений дальности действия прибора наблюдения $P(R)$ для цели, движущейся на курсовом параметре нуль, для $P(X)$ также можно построить серию графиков для различных физических условий (рис. 3.15).

На рис. 3.16 приведены типичные зависимости вероятности обнаружения от траверзного расстояния.

Рис. 3.16, а характеризует закон определенной дальности, применимый, например, для оценки эффективности обнаружения очень крупных целей очень мощными приборами наблюдения в благоприятных условиях. Это идеальный случай. Рис. 3.16, б, в характеризует наиболее типичные реальные ситуации.

На рис. 3.16, *г* представлена зависимость $P(X)$ при наличии помех (например, отражения от местных предметов для радиолокатора или эффект проскакивания цели под кораблем для гидролокатора).

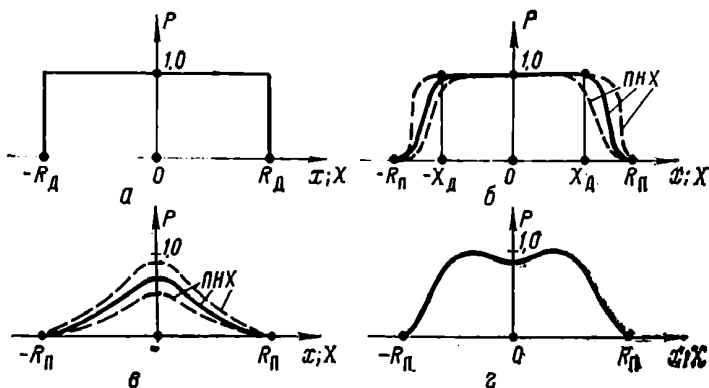


Рис. 3.16. Типичные кривые $P(X)$ для достоверного *а*, высокоэффективного *б*, низкоэффективного *в*, обнаружения цели с курсовым параметром, отличным от нуля; *г* — особый случай. Условия наблюдения плохие *П*, нормальные *Н* и хорошие *Х*

3.2.2. Распределение истинной дальности обнаружения

С математической точки зрения первоначальные условия для нахождения аналитического выражения закона распределения истинных дальностей могут быть сформулированы следующим образом [25, 32].

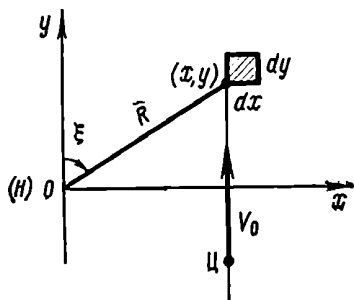


Рис. 3.17. К определению элементарной вероятности обнаружения цели с курсовым параметром, отличным от нуля

Предположим, что цели равномерно распределены по всей площади района поиска с плотностью N целей/км² и все они движутся относительно наблюдателя равномерно и прямолинейно с векторной скоростью $\vec{V}_0$ параллельно оси y (рис. 3.17). Требуется определить выражение для нахождения вероятности обнаружения целей на данной дальности. Для решения этой задачи

найдем сначала среднее количество целей dN_0 , которое будет обнаружено за единицу времени на элементарном участке площадью $dx dy$. Очевидно, что

$$dN_0 = N \Omega(x, y) dx dy, \quad (3.32)$$

где $\Omega(x, y)$ — функция интенсивности потока — средний поток целей, протекающий за единицу времени через точку с координатами x, y .

Аналитическое выражение для функции $\Omega(x, y)$ может быть найдено путем следующих рассуждений. Цель, перемещающаяся с относительной скоростью V_0 в направлении возрастания y , будет находиться в пределах элементарной площади $dx dy$ в течение времени $dt = \frac{dy}{V_0}$.

Вероятность обнаружения цели за это время равна произведению двух вероятностей: вероятности того, что цель ранее не была обнаружена, и вероятности того, что обнаружение цели произойдет как раз во время пересечения ею площади $dx dy$.

Первая вероятность соответственно для дискретного и непрерывного наблюдений из выражений (3.15) и (3.16) определится

$$\begin{aligned} Q(n) &= 1 - P(n) = 1 - \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n [1 - g_i(R)] \right\} = \\ &= \prod_{i=1}^n [1 - g_i(R)]; \\ Q(t) &= 1 - P(t) = 1 - \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t \gamma_i(R) dt \right] \right\} = \\ &= \exp \left[- \int_0^t \gamma_i(R) dt \right]. \end{aligned}$$

Вторая вероятность в случае дискретного обследования пространства с периодом дискретности T определяется вероятностями совместного появления двух независимых событий: вероятностью того, что мгновенное наблюдение будет как раз в момент прохождения цели в пределах площади $dx dy$, и мгновенной вероятностью обнаружения цели, находящейся на расстоянии $R \equiv r$ от наблюдателя:

$$\frac{g_i(R) dt}{T} = \frac{g_i(R) dy}{TV_0}. \quad (3.33)$$

В случае непрерывного обследования пространства

$$\gamma_t(R) dt = \gamma_t(R) \frac{dy}{V_0}. \quad (3.34)$$

Таким образом, вероятность обнаружения цели в элементарной площади $dx dy$:

— при дискретном обследовании

$$P(x, y) = \prod_{i=1}^n [1 - g_i(R)] \frac{g_i(R) dy}{V_0 T}; \quad (3.35)$$

— при непрерывном обследовании

$$P(x, y) = \exp \left[- \int_0^t \gamma_t(R) dt \right] \gamma_t(R) \frac{dy}{V_0}. \quad (3.36)$$

Учитывая, что за единицу времени в пределы площади входит $N V_0 dx$ целей, среднее количество обнаружений за единицу времени:

— при дискретном обследовании

$$\begin{aligned} dN_0 &= N V_0 P(x, y) dx = N V_0 \prod_{i=1}^n [1 - g_i(R)] \frac{g_i(R)}{V_0 T} dx dy = \\ &= \frac{N}{T} \prod_{i=1}^n [1 - g_i(R)] g_i(R) dx dy; \end{aligned} \quad (3.37)$$

— при непрерывном обследовании

$$\begin{aligned} dN_0 &= N V_0 P(x, y) dx = N V_0 \exp \left[- \int_0^t \gamma_t(R) dt \right] \times \\ &\times \frac{\gamma_t(R)}{V_0} dx dy = N \exp \left[- \int_0^t \gamma_t(R) dt \right] \gamma_t(R) dx dy. \end{aligned} \quad (3.38)$$

Ввиду того что с помощью формулы (3.32) и соответственно формул (3.37) и (3.38) определяется одна и та же физическая величина, можно приравнять их правые части:

— для дискретного обследования

$$N \Omega(x, y) dx dy = \frac{N}{T} \prod_{i=1}^n [1 - g_i(R)] g_i(R) dx dy; \quad (3.39)$$

— для непрерывного обследования

$$N \Omega(x, y) dx dy = N \exp \left[- \int_0^t \gamma_t(R) dt \right] \gamma_t(R) dx dy. \quad (3.40)$$

Из уравнений (3.39) и (3.40) находятся аналитические выражения для функции $\Omega(x, y)$:

— при дискретном обследовании

$$\Omega(x, y) = \prod_{l=1}^n [1 - g_l(R)] \frac{g_l(R)}{T}, \quad (3.41)$$

— при непрерывном обследовании

$$\Omega(x, y) = \exp \left[- \int_0^t \gamma_t(R) dt \right] \gamma_t(R). \quad (3.42)$$

Используя формулу (3.32), можно рассчитать среднее количество целей $N_0 = N_0(S)$, обнаруживаемых наблюдателем за единицу времени в пределах некоторой площади S , перемещающейся вместе с ним:

$$N_0 = N_0(S) = N \iint_S \Omega(x, y) dx dy. \quad (3.43)$$

Когда площадь $S = S_R$ представляет собой круг радиуса R_n с центром в точке нахождения наблюдателя, целесообразно от прямоугольной системы координат перейти к полярной, в которой за полярную ось принять ось y , за радиус-вектор — вектор $\vec{R} \equiv \vec{r}$, а за полярный угол — угол ξ , отсчитываемый от положительного направления оси y по часовой стрелке. В полярной системе координат уравнение (3.43) будет иметь вид

$$N_0(S_R) = N \int_0^{R_n} dR \int_0^{2\pi} R \Omega(R \sin \xi, R \cos \xi) d\xi. \quad (3.44)$$

Так как среднее количество целей, обнаруживаемых наблюдателем за единицу времени на расстоянии, заключенном между R и $R + dR$, пропорционально плотности целей N и элементу дальности dR , то

$$dN_0 = dN_0(R) = N \rho(R) dR, \quad (3.45)$$

где $\rho(R)$ — коэффициент пропорциональности, характеризующий интенсивность потока целей, который протекает за единицу времени на расстоянии R от наблюдателя при данной плотности целей N , и

$$N_0(S_R) = N \int_0^{R_n} \rho(R) dR. \quad (3.46)$$

Приравнивая правые части уравнений (3.44) и (3.46), получаем

$$N \int_0^{R_n} dR \int_0^{2\pi} R \Omega(R \sin \xi, R \cos \xi) d\xi = N \int_0^{R_n} \rho(R) dR. \quad (3.47)$$

Продифференцируем обе части полученного равенства по R :

$$\rho(R) = \int_0^{2\pi} R \Omega(R \sin \xi, R \cos \xi) d\xi. \quad (3.48)$$

Функция $\rho(R)$, описываемая уравнением (3.48), выражает закон плотности распределения истинных дальностей обнаружения (рис. 3.18).

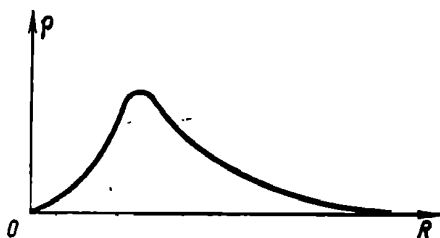


Рис. 3.18. Типовая кривая распределения истинной дальности обнаружения цели с курсовым параметром, отличным от нуля

На больших дистанциях обнаруживается очень мало целей в силу низкой эффективности приборов наблюдения, а на малых — в силу того, что маловероятно проникновение целей, будучи необнаруженными на больших расстояниях.

3.3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ (ОБНАРУЖЕНИЯ)

Способность прибора наблюдения обнаруживать цель, проходящую через зону его действия на курсовом параметре X , характеризуется распределением боковой дальности обнаружения цели $P(X)$, а способность прибора наблюдения обнаруживать цель, сближающуюся с ним до дистанции R , — распределением $P(R)$. Эти распределения очень удобны (в особенности когда они подчиняются нормальному закону распределения) для оценки способности

прибора наблюдения обнаруживать цель с вероятностной точки зрения. Но использование их на практике не всегда приемлемо. В некоторых случаях, например, при расчетах систем наблюдения, разведки, дозора и других необходимо иметь однозначные характеристики зоны действия прибора наблюдения, эквивалентные по эффективности этим распределениям [3, 18, 25, 32, 39].

3.3.1. Эффективная дальность обнаружения цели, движущейся на курсовом параметре, близком к нулю

Эта характеристика (обозначим ее D_3) является простейшей, эквивалентной распределению дальности обнаружения $P(R_0)$. Она определяется путём эквивалентной за-

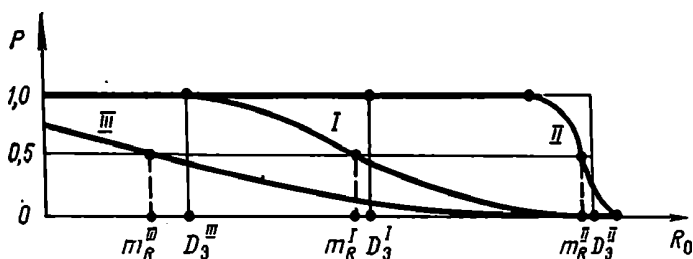


Рис. 3.19. К определению эффективной дальности обнаружения цели, движущейся на курсовом параметре нуль, для приборов средней *I*, высокой *II* и низкой *III* эффективности

мены площади под кривой интегрального распределения $P(R_0)$ площадью равновеликого прямоугольника (рис. 3.19) с высотой $P=1$ и с основанием, равным D_3 :

$$\begin{aligned} D_3 \cdot 1 &= \int_0^{\infty} P(R) dR = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \Psi(R) dR dR = \\ &= \int_0^{\infty} dR \int_0^{\infty} \Psi(R) dR = \int_0^{\infty} R \Psi(R) dR. \end{aligned}$$

Таким образом, это означает определение $\bar{R}$ — математического ожидания величины R при возможных пределах ее изменения от 0 до ∞ (R_n). Следовательно,

$$D_3 = \bar{R} = \int_0^{\infty} R \Psi(R) dR \approx \int_0^{R_n} R \Psi(R) dR. \quad (3.49)$$

Решением этого интеграла применительно к нормальному закону распределения дальности действия прибора наблюдения будет

$$D_0 = \frac{\sigma_R}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{m_R^2}{2\sigma_R^2}} + \left[1 + \Phi\left(\frac{m_R}{\sqrt{2}\sigma_R}\right) \right]. \quad (3.50)$$

Пример 3.2. Определить D_0 для различных по эффективности приборов наблюдения, дальность действия которых характеризуется нормальным распределением с параметрами: 1) $m_R = \sigma_R = 20$ км; 2) $m_R = 300$ км, $\sigma_R = 30$ км и 3) $m_R = 2$ км, $\sigma_R = 6$ км.

Решение.

$$1. D_0^I = \frac{20}{\sqrt{6,28}} e^{-\frac{1}{2}} + 10 \left[1 + \Phi\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \right] = \frac{20 \cdot 0,6}{2,56} + 10(1 + 0,68) \text{ км} = 21,5 \text{ км}.$$

$$2. D_0^{II} = \frac{30}{\sqrt{6,28}} e^{-50} + 150(1 + 1) \approx (0 + 300) \text{ км} \approx 300 \text{ км}.$$

$$3. D_0^{III} = \frac{6}{\sqrt{6,28}} e^{-\frac{1}{18}} + 1(1 + 0,25) = (2,2 + 1,25) \text{ км} = 3,45 \text{ км}.$$

Из примера видно, что для высокоэффективных приборов ($m_R \gg \sigma_R$) можно принять: $D_0 = m_R$.

Низкоэффективные приборы могут пропускать цели незамеченными, чем и объясняется расхождение между D_0 и m_R . Поэтому характеристику D_0 для оценки таких приборов следует применять осторожно.

Несмотря на отмеченное ограничение, эффективная дальность является однозначной линейной характеристикой эффективности обнаружения целей, движущихся на курсовых параметрах, близких к нулю. Это дает, например, возможность однозначно характеризовать круговую зону эффективного обнаружения атакующих или атакуемых целей. В более общем случае для оценки эффективности обнаружения целей, движущихся на курсовых параметрах, отличных от нуля, существуют другие характеристики.

3.3.2. Эффективный радиус действия и эффективная ячейка наблюдения

Эффективный радиус действия R_0 получается путем эквивалентной замены объема, образующегося под кривой $P(R)$ при вращении ее вокруг оси P , равновеликим объемом цилиндра с высотой, равной единице (рис. 3.20). Радиус этого цилиндра и рассматривается в качестве эффективного радиуса действия R_0 прибора наблюдения. Счита-

ем, что в пределах зоны, ограниченной R_3 , цели обнаруживаются (наблюдаются) с такой же эффективностью, как и в пределах зоны, характеризуемой распределением $P(R)$. Таким образом, снова получаем однозначную характеристику эффективности прибора наблюдения, характеризующую непосредственно дальность его действия в определенном диапазоне условий наблюдения, для которых составлено распределение $P(R)$.

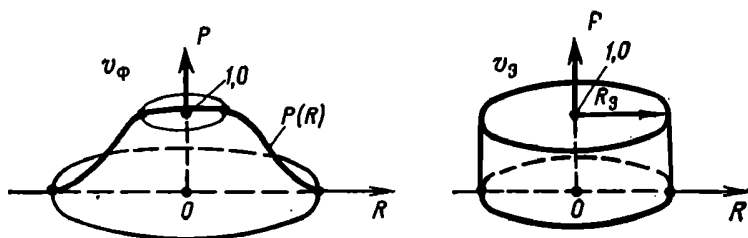


Рис. 3.20. Схема определения эффективного радиуса действия

Определим выражение для R_3 в случае нормального закона распределения $P(R)$:

$$P(R) = \int_R^{\infty} \Psi(R) dR = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} \int_R^{\infty} e^{-\frac{(R-m_R)^2}{2\sigma_R^2}} dR =$$

$$= \frac{1}{2} \left[1 - \Phi\left(\frac{R-m_R}{\sqrt{2}\sigma_R}\right) \right].$$

Обозначим v_ϕ объем фигуры, образуемой при вращении кривой $P(R)$ вокруг оси P , а v_3 — объем эквивалентного цилиндра:

$$v_\phi = v_3; \quad (3.51)$$

$$v_3 = \pi R_3^2 \cdot 1; \quad (3.52)$$

$$v_\phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} P(R) R dR d\xi = 2\pi \int_0^{\infty} R P(R) dR =$$

$$= 2\pi \left[R^2 P(R) - \int_0^{\infty} R^2 \Psi(R) dR \right].$$

Решением этого интеграла применительно к нормальному закону будет

$$v_{\phi} = \pi \left\{ \frac{m_R^2 + \sigma_R^2}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{m_R}{\sqrt{2}\sigma_R} \right) \right] + \frac{m_R \sigma_R}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{m_R^2}{2\sigma_R^2}} \right\}. \quad (3.53)$$

Из выражений (3.51) и (3.52)

$$R_0 = \sqrt{\frac{v_{\phi}}{\pi}}. \quad (3.54)$$

После подстановки получим

$$R_0 = \sqrt{\frac{1}{2} (m_R^2 + \sigma_R^2) \left[1 + \Phi \left(\frac{m_R}{\sqrt{2}\sigma_R} \right) \right] + \frac{m_R \sigma_R}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{m_R^2}{2\sigma_R^2}}}. \quad (3.55)$$

Зная числовые характеристики нормального закона m_R и σ_R , можно найти эффективное значение дальности действия прибора наблюдения.

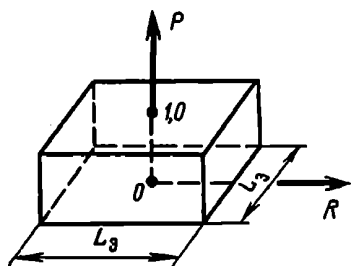


Рис. 3.21. Схема определения эффективной ячейки наблюдения

Зона, ограниченная радиусом R_0 , может рассматриваться условно в качестве эффективной зоны действия прибора наблюдения, в пределах которой цели данного типа, для которых составлено распределение $P(R)$, обнаруживаются (наблюдаются) достоверно.

При $\frac{m_R}{\sigma_R} \geq 5$ прибор наблюдения считается высокоэффективным и с достаточной точностью можно принять $R_0 \approx m_R$.

Если $\frac{m_R}{\sigma_R} < 5$, то R_0 вычисляется по формуле (3.55).

Рассмотрим еще одну характеристику, так называемую эффективную ячейку наблюдения L_0^2 , которая получается (рис. 3.21) путем эквивалентной замены объема цилиндра v_0 (или v_{ϕ}) объемом прямоугольного параллелепипеда со стороной основания L_0 и высотой, равной единице:

$$L_0^2 = \pi R_0^2; \quad L_0 = \sqrt{\pi} R_0. \quad (3.56)$$

Эффективную ячейку наблюдения удобно применять (рис. 3.22) при расчете полей наблюдения. Зная площадь

района обследования, можно определить необходимое количество станций для обеспечения эффективного обнаружения цели

$$N = \frac{L_1 L_2}{L_3^2} \quad (3.57)$$

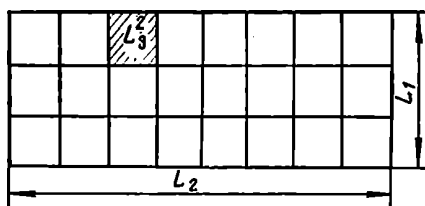


Рис. 3.22. Схема применения эффективной ячейки наблюдения

3.3.3. Эффективная ширина полосы поиска (обнаружения) цели, движущейся на курсовом параметре, отличном от нуля

В ряде случаев для расчетов выгодно использовать эффективную ширину полосы поиска W , которая определяется путем замены площади S_k под кривой $P(X)$ площадью S_n равновеликого прямоугольника (1) с высотой, равной единице (рис. 3.23):

$$S_n = W \cdot 1 = W; \quad S_k = \int_{-\infty}^{\infty} P(X) dX.$$

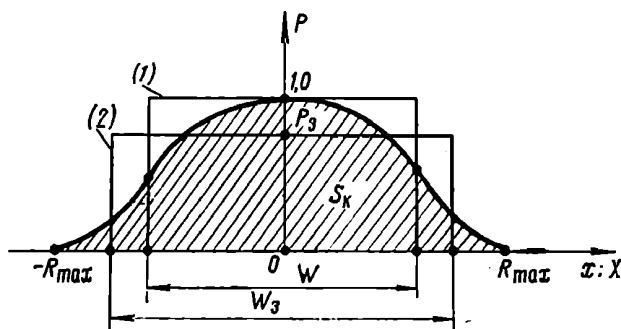


Рис. 3.23. Схема определения эффективной ширины полосы поиска (обнаружения) цели

Если $S_n = S_k$, то

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} P(X) dX \approx \int_{-R_n}^{R_n} P(X) dX. \quad (3.58)$$

В пределах ширины полосы W цели обнаруживаются с такой же эффективностью, как и в пределах всего распределения $P(X)$. Величина W рассматривается в качестве эффективной ширины полосы поиска, свойственной данному прибору наблюдения.

По аналогии иногда может быть использована и ширина полосы поиска (захвата) W_3 с заданной вероятностью обнаружения цели P_3 на основе приравнивания площади прямоугольника (2) и площади под кривой $P(X)$:

$$W_3 P_3 = \int_{-\infty}^{\infty} P(X) dX;$$

откуда

$$W_3 = \frac{1}{P_3} \int_{-\infty}^{\infty} P(X) dX \approx \frac{1}{P_3} \int_{-R_n}^{R_n} P(X) dX = \frac{W}{P_3}. \quad (3.59)$$

Характеристика W позволяет просто определять необходимое количество N_p сил поиска или сил и средств на рубеже наблюдения

$$N_p = \frac{L}{W}, \quad (3.60)$$

где L — длина рубежа.

Величина W может быть определена и опытным путем на основе прямых испытаний [3, 39]. Но такой способ имеет значительные недостатки, связанные главным образом с трудностями проведения подобных испытаний. Поэтому иногда более приемлемым считается способ определения величины W с помощью характеристик мгновенной вероятности. В частности, это удобнее сделать с помощью характеристики мгновенной плотности вероятности обнаружения по дальности f , которая уже была рассмотрена в подразд. 3.1.1.

Для случая движения цели на курсовом параметре X ожидание обнаружения $\varphi(X)$ дается [39] выражением

$$\varphi(X) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\sqrt{X^2 + Y^2}) dY, \quad (3.61)$$

а вероятность обнаружения цели при ожидании обнаружения $\varphi(X)$:

$$P(X) = 1 - e^{-\varphi(X)} = 1 - \exp[-\varphi(X)]. \quad (3.62)$$

Как видим, появляется возможность найти величину W на основании формул (3.58), (3.61), (3.62). После подстановки выражения (3.61) в выражение (3.62), а выражения (3.62) в выражение (3.58) получим

$$\begin{aligned} W &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ 1 - \exp \left[- \int_{-\infty}^{\infty} f(\sqrt{X^2 + Y^2}) dY \right] \right\} dX \approx \\ &\approx \int_{-R_n}^{R_n} \left\{ 1 - \exp \left[- \int_{-R_n}^{R_n} f(\sqrt{X^2 + Y^2}) dY \right] \right\} dX. \end{aligned} \quad (3.63)$$

Формула (3.63) — общее аналитическое выражение для определения эффективной ширины полосы поиска (захвата) цели прибором наблюдения W , в которой как бы обеспечивается достоверное обнаружение рассматриваемого типа цели.

Простота и удобство применения характеристики W обуславливают широкое внедрение ее в практику расчетов, связанных с решением задач поиска и обнаружения целей.

3.3.4. Средняя дальность обнаружения цели, проходящей через зону действия прибора наблюдения

Зная закон распределения истинной дальности $\rho(R)$, можно определить среднюю дальность обнаружения целей, проходящих через зону действия прибора наблюдения (или входящих в зону) на курсовом параметре, отличном от нуля. Покажем это.

Если известно, что цель может быть обнаружена, но на неизвестном расстоянии, то вероятность, что расстояние обнаружения заключено в пределах между R и $R+dR$:

$$p = \rho(R) \frac{dR}{V_0 W}, \quad (3.64)$$

где V_0 — относительная скорость цели;
 W — эффективная ширина полосы поиска.

Средняя истинная дальность обнаружения целей определится как математическое ожидание дальности обнаружения

$$\bar{R}_n = \sum_{i=1}^n p_i R_i,$$

где p_i — вероятность того, что цель будет обнаружена на дальности R_i .

В общем случае, подставляя значение p из уравнения (3.64), получаем

$$\bar{R}_n = \frac{1}{WV_0} \int_0^{\infty} R p(R) dR \approx \frac{1}{WV_0} \int_0^{R_n} R p(R) dR. \quad (3.65)$$

Используя формулу (3.48), окончательно получим

$$\bar{R}_n \approx \frac{1}{WV_0} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_n} R^2 \Omega(R \sin \xi, R \cos \xi) d\xi dR. \quad (3.66)$$

Эта характеристика необходима для оценки своевременности обнаружения целей совмещенными системами наблюдения и для определения эффективных зон обнаружения целей в несовмещенных системах наблюдения.

3.4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УПРЕЖДЕНИЯ В ОБНАРУЖЕНИИ ПРИ ВЗАИМНОМ И СОВМЕСТНОМ НАБЛЮДЕНИИ

3.4.1. Простейшие методы сравнительной оценки упреждения

В ряде случаев (при расхождении своих самолетов или кораблей, при возвращении их на базу и т. п.) необходимо достаточно точно знать конкретные значения ожидаемых дальностей действия средств наблюдения наблюдателя и цели R_n и $R_{ц}$. В этих случаях оценка упреждения в обнаружении может основываться на простом сравнении величин R_n и $R_{ц}$. В некоторых случаях, например при $m_R \gg \sigma_R$, а иногда и при $m_R > \sigma_R$ и в неопределенных физических условиях наблюдения можно с достаточными основаниями пренебрегать разбросом дальностей обнаружения, считать эти дальности не случайными и принимать их равными математическим ожиданиям либо значениям эффективного радиуса R_0 . При этом сравнение величин m_{Rn} и $m_{Rц}$ более правомерно в ситуациях, когда объекты сближаются на

курсовом параметре, близком к пулю (например, при встрече), и когда приборы наблюдения объектов соответственно характеризуются достаточно большими $\sigma_{РН}$ и $\sigma_{РЦ}$ по сравнению с $m_{РН}$ и $m_{РЦ}$. Для мощных приборов наблюдения (при малых $\sigma_{РН}$ и $\sigma_{РЦ}$ по сравнению с $m_{РН}$ и $m_{РЦ}$) оценить упреждение можно, сравнив эффективные радиусы действия приборов наблюдения наблюдателя и цели $R_{эп}$ и $R_{эц}$.

Для общего случая сближения на курсовом параметре, отличном от нуля, более правомерным для неопределенных физических условий будет сравнение средних значений истинных дальностей обнаружения $\bar{R}_{пп}$ и $\bar{R}_{пц}$.

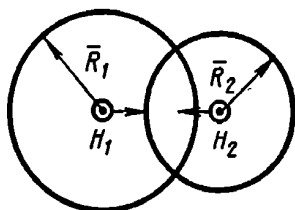


Рис. 3.24. Схема взаимного обнаружения объектов

При таком допущении задача оценки опережения решается просто — обнаружит первым тот прибор наблюдения, у которого дальность действия больше (рис. 3.24).

3.4.2. Метод сравнения распределений дальности действия (обнаружения)

Когда возникает задача обнаружения объектов противника, имеющих свои средства обнаружения, подход, рассмотренный в подразд. 3.4.1, был бы чрезмерно грубым, так как из-за рассеивания дальностей с известной вероятностью первым может обнаружить и тот, у кого, например, математическое ожидание дальности обнаружения меньше. Как же более точно оценить опережение в обнаружении? В [2, 22] рассматривается метод оценки, основанный на сравнении распределений дальности действия средств цели и наблюдателя.

Обозначим через $\sigma_{РН}$ и $\sigma_{РЦ}$ среднеквадратические отклонения дальностей обнаружения наблюдателем цели и целью наблюдателя соответственно.

Для простоты будем считать, что распределения дальностей обнаружения подчиняются нормальному закону. Тогда закон распределения разностей дальностей обнаружения, как результат композиции двух законов распределения, должен быть еще ближе к нормальному закону, чем каждый из этих законов в отдельности. Считая разность дальностей обнаружения подчиняющейся нормальному закону распределения с математическим ожиданием

$(m_{Rn} - m_{Rn})$ и дисперсией $(\sigma_{Rn}^2 + \sigma_{Rn}^2)$, получим:

$$P(R_n - R_n > 0) = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{m_{Rn} - m_{Rn}}{\sqrt{\sigma_{Rn}^2 + \sigma_{Rn}^2}} \right) \right]; \quad (3.67)$$

$$P(R_n - R_n < 0) = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{m_{Rn} - m_{Rn}}{\sqrt{\sigma_{Rn}^2 + \sigma_{Rn}^2}} \right) \right]. \quad (3.68)$$

С вероятностью $P(R_n > R_n)$ наблюдатель обнаружит цель первым, а с вероятностью $P(R_n < R_n)$ первым будет обнаружен наблюдатель.

Рассмотренный метод может быть применен при известных распределениях как дальностей действия приборов наблюдения, так и боковых дальностей обнаружения, характеризующихся нормальным законом.

Рассмотрим несколько иной способ оценки упреждения в обнаружении, базирующийся на использовании характеристик мгновенной и накапливающейся вероятностей обнаружения [25, 32].

3.4.3. Метод сравнения накапливающихся вероятностей обнаружения

Предположим, что наблюдатель и цель с помощью своих средств наблюдения осуществляют взаимный поиск путем непрерывного обследования пространства.

Пусть при этом эффективность средств наблюдения наблюдателя и цели оценивается соответственно элементарными вероятностями $\gamma'_i dt$ и $\gamma''_i dt$. Поэтому на основании формулы (3.14) вероятность того, что наблюдатель обнаружит цель за время t :

$$P_n(t) = 1 - \exp \left(- \int_0^t \gamma'_i dt \right), \quad (3.69)$$

а вероятность того, что цель обнаружит наблюдателя за это же время

$$P_n(t) = 1 - \exp \left(- \int_0^t \gamma''_i dt \right). \quad (3.70)$$

Обозначим через $P_n^*(t + dt)$ вероятность того, что за время $t + dt$ наблюдатель обнаружит цель не позднее, чем цель обнаружит наблюдателя. Это событие может осуществляться двумя независимыми путями:

— наблюдатель опередит в обнаружении цель за время t ;

— за время t никто никого не обнаружит, а за время dt наблюдатель обнаружит цель.

Вероятность появления первого события есть искомая вероятность $P_n^*(t)$, а вероятность появления второго события равна произведению вероятностей появления трех независимых, но совместных событий:

— вероятности того, что наблюдатель за время t не обнаружит цель $[1 - P_n(t)]$;

— вероятности того, что цель за время t не обнаружит наблюдателя $[1 - P_n(t)]$;

— вероятности того, что наблюдатель обнаружит цель за время dt ($\gamma'_i dt$).

Поэтому на основании формулы полной вероятности

$$P_n^*(t + dt) = P_n^*(t) + [1 - P_n(t)][1 - P_n(t)]\gamma'_i dt.$$

Представим это уравнение в виде

$$\frac{P_n^*(t + dt) - P_n^*(t)}{dt} = [1 - P_n(t)][1 - P_n(t)]\gamma'_i,$$

что эквивалентно дифференциальному уравнению

$$\frac{dP_n^*(t)}{dt} = [1 - P_n(t)][1 - P_n(t)]\gamma'_i.$$

С учетом формул (3.69) и (3.70) получаем

$$\frac{dP_n^*(t)}{dt} = \gamma'_i \exp \left[- \int_0^t (\gamma'_i + \gamma''_i) dt \right].$$

После интегрирования получаем

$$P_n^*(t) = \int_0^t \gamma'_i \exp \left[- \int_0^t (\gamma'_i + \gamma''_i) dt \right] dt. \quad (3.71)$$

Путем аналогичных рассуждений находим

$$P_n^*(t) = \int_0^t \gamma''_i \exp \left[- \int_0^t (\gamma'_i + \gamma''_i) dt \right] dt. \quad (3.72)$$

Равенства (3.71) и (3.72) являются соответственно конечными выражениями для расчета вероятности того, что наблюдатель обнаружит цель первым, и вероятности того, что цель обнаружит наблюдателя первой за время t .

3.4.4. Эффективность обнаружения при совместном наблюдении

Рассмотренные методы оценки опережения в обнаружении при взаимном поиске справедливы и для совместного поиска цели. При этом формула (3.71) дает вероятность того, что первый наблюдатель обнаружит цель первым, а формула (3.72) дает вероятность того, что первым обнаружит цель второй наблюдатель. Обозначим эти вероятности соответственно $P_{н1}(t)$ и $P_{н2}(t)$. Тогда $P_{н1}(t) + P_{н2}(t)$ есть вероятность обнаружения цели или первым, или вторым наблюдателем, характеризующая суммарную эффективность обнаружения цели при совместном наблюдении:

$$\begin{aligned} P_{н1}(t) + P_{н2}(t) &= \int_0^t \gamma'_t \exp \left[- \int_0^t (\gamma'_t + \gamma''_t) dt \right] dt + \\ &+ \int_0^t \gamma''_t \exp \left[- \int_0^t (\gamma'_t + \gamma''_t) dt \right] dt = \\ &= \int_0^t (\gamma'_t + \gamma''_t) \exp \left[- \int_0^t (\gamma'_t + \gamma''_t) dt \right] dt. \end{aligned}$$

Обозначим

$$- \int_0^t (\gamma'_t + \gamma''_t) dt = x,$$

тогда $dx = -(\gamma'_t + \gamma''_t) dt$.

В результате

$$\begin{aligned} P_{н1}(t) + P_{н2}(t) &= - \int_0^x e^x dx = \int_{-x}^0 e^x dx = \\ &= 1 - \exp \left[- \int_0^t (\gamma'_t + \gamma''_t) dt \right]. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$P_{н1}(t) + P_{н2}(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t (\gamma'_t + \gamma''_t) dt \right]. \quad (3.73)$$

Выражение (3.73) по сути есть выражение (3.14), в котором $\gamma_t dt$ заменено $(\gamma'_t + \gamma''_t) dt$; при этом последняя величина представляет собой элементарную вероятность об-

наружения, когда оба средства наблюдения используются одновременно. Полученный результат свидетельствует об аддитивности потенциалов обнаружения сопряженных наблюдателей.

3.5. ВЕЛИЧИНА УПРЕЖДЕНИЯ В ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ. АПРИОРНЫЕ И АПОСТЕРИОРНЫЕ ВЕРОЯТНОСТИ УПРЕЖДЕНИЯ

Рассматривая вопрос обнаружения целей средствами технического наблюдения, не следует забывать о том, что противник также имеет средства технического наблюдения и ведет наблюдение, пытаясь обнаружить наши объекты.

Принятие того или иного решения по тактике действия часто зависит от оценки вероятности обнаружения противником наших объектов в тот момент, когда мы его обнаруживаем. Так, например, применение активных средств наблюдения или применение помех наблюдению противника нецелесообразно до тех пор, пока существует уверенность в том, что противник нас еще не обнаружил, так как эти средства не обладают свойством скрытности.

Часто успех боевых действий зависит от того, кто первый обнаружит своего противника. Следовательно, решение задачи упреждения (опережения) в обнаружении приобретает не только теоретический, но и практический интерес.

Задача опережения при этом может ставиться двояким образом:

- оценить априорные вероятности упреждения в обнаружении целей исходя из некоторой предварительной информации о средствах наблюдения, имеющихся у противника и у нас;

- оценить апостериорные вероятности обнаружения, т. е. определить вероятность обнаружения противником нас в момент, когда мы его обнаружили на определенной дальности.

3.5.1. Оценка априорных вероятностей упреждения

Рассмотрим наиболее простой случай, когда дальности обнаружения целей приборами наблюдения цели и наблюдателя подчиняются закону определенной дальности и известны нам.

(В случае закона определенной дальности

$$P_{\text{обн}} = \begin{cases} 0, & \text{если } R > R_{\text{н}} \text{ (или } R > R_{\text{ц}}); \\ 1, & \text{если } R \leq R_{\text{н}} \text{ (или } R \leq R_{\text{ц}}), \end{cases}$$

где $P_{\text{обн}}$ — вероятность обнаружения цели;

R — расстояние между наблюдателем и целью;

$R_{\text{н}}$, $R_{\text{ц}}$ — дальности обнаружения нашей станцией противника и станцией противника нашего объекта соответственно.

Предварительные знания о средствах наблюдения противника могут быть получены, например, исходя из разведанных тактических параметров этих средств.

В рассматриваемом случае оценить опережение при обнаружении можно следующим простейшим способом.

Пусть

$$L = R_{\text{н}} - R_{\text{ц}}. \quad (3.74)$$

Если $L > 0$, то первыми обнаруживаем цель мы; если же $L < 0$, то первым обнаруживает противник нас.

Однако у реальных станций дальность обнаружения целей является величиной случайной, подчиняющейся определенным законам распределения. Поэтому необходимо ввести вероятностную оценку в анализ опережения при обнаружении.

Пусть $f(R_{\text{н}})$ — плотность распределения дальности обнаружения нашей станцией противника; $f(R_{\text{ц}})$ — плотность распределения дальности обнаружения станцией противника нашего объекта; $M[R_{\text{н}}]$, $M[R_{\text{ц}}]$, $D[R_{\text{н}}]$, $D[R_{\text{ц}}]$ — соответственно математические ожидания и дисперсии дальности обнаружения нашей станции и станции противника.

Мы будем рассматривать тот случай, когда случайные величины $R_{\text{н}}$ и $R_{\text{ц}}$ являются статистически независимыми. Это может быть тогда, когда противоборствующие объекты применяют для наблюдения, например, только пассивные средства (поисковые станции, оптику, шумопеленгаторы) или только активные средства (радиолокаторы, светолокаторы, гидролокаторы).

В этом случае плотность распределения системы случайных величин $R_{\text{н}}$ и $R_{\text{ц}}$ выразится произведением плотностей распределения каждой из этих случайных величин

$$f(R_{\text{н}}, R_{\text{ц}}) = f(R_{\text{н}}) f(R_{\text{ц}}).$$

Определим математическое ожидание функции $L = R_n - R_u$:

$$\begin{aligned} m_L &= M[R_n - R_u] = \iint_{-\infty}^{\infty} (R_n - R_u) f(R_n, R_u) dR_n dR_u = \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} R_n f(R_n, R_u) dR_n dR_u - \iint_{-\infty}^{\infty} R_u f(R_n, R_u) dR_n dR_u = \\ &= M[R_n] - M[R_u]. \end{aligned} \quad (3.75)$$

Иначе говоря, математическое ожидание разности в дальностях обнаружения равно разности математических ожиданий дальности обнаружения нашей станции и станции противника.

Определим дисперсию функции L . Для этого функцию L запишем через центрированные случайные величины, вычитая из каждого члена разности его математическое ожидание

$$\tilde{L} = \dot{R}_n - \dot{R}_u.$$

Дисперсия случайной величины L :

$$\begin{aligned} D[R_n - R_u] &= M[(\dot{R}_n - \dot{R}_u)^2] = M[\dot{R}_n^2 - 2\dot{R}_n\dot{R}_u + \dot{R}_u^2] = \\ &= M[\dot{R}_n^2] - 2M[\dot{R}_n\dot{R}_u] + M[\dot{R}_u^2] = D[R_n] - 2K_{nu} + D[R_u]. \end{aligned} \quad (3.76)$$

Дисперсия разности дальностей обнаружения равна сумме дисперсий дальностей обнаружения каждого из приборов наблюдения без удвоенной величины корреляционного момента.

Так как мы рассматриваем систему независимых случайных величин, подчиняющихся нормальному закону распределения, то корреляционный момент

$$K_{nu} = M[\dot{R}_n\dot{R}_u] = 0.$$

Тогда среднеквадратическое отклонение величины

$$\sigma_L = \sqrt{D[R_n - R_u]} = \sqrt{D[R_n] + D[R_u]}. \quad (3.77)$$

Так как случайные величины R_n и R_u подчиняются нормальному закону распределения, то плотность распределения случайной величины L :

$$f(L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} e^{-\frac{(L-m_L)^2}{2\sigma_L^2}}, \quad (3.78)$$

где в соответствии с формулами (3.75) и (3.77) и обозначениями, принятыми в подразд. 2.2.2:

$$m_L = M[R_u] - M[R_u] = m_{R_u} - m_{R_u};$$

$$\sigma_L = \sqrt{D[R_u] - R_u} = \sqrt{D[R_u] + D[R_u]} = \sqrt{\sigma_{R_u}^2 + \sigma_{R_u}^2}.$$

Имея плотность распределения случайной величины L , можно рассчитать априорную вероятность упреждения в обнаружении противника.

Вероятность того, что мы обнаружим противника первыми

$$P(L > 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(L-m_L)^2}{2\sigma_L^2}} dL \quad (3.79)$$

или через функцию Лапласа [13]

$$P(L > 0) = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi\left(\frac{m_L}{\sigma_L \sqrt{2}}\right) \right]. \quad (3.80)$$

Вероятность того, что противник первым обнаружит нас

$$P(L < 0) = 1 - P(L > 0). \quad (3.81)$$

В некоторых случаях при различных расчетах может появиться необходимость оценить вероятность того, что мы получим упреждение d в дальности обнаружения целей по сравнению с дальностью обнаружения противником наших объектов.

Величина d может определяться необходимостью приведения оружия в боевую готовность либо необходимостью совершения тактического маневра и т. п. Иначе говоря, эта величина характеризует возможность проведения внезапных тактических действий по объектам противника, так как противник еще нас не обнаружил, а мы его уже наблюдаем и принимаем определенные решения в соответствии со стоящими задачами. Требуемое упреждение в дальности обнаружения d может быть рассчитано по формуле

$$d = \text{ОВИР} \cdot t_3,$$

где t_3 — время, необходимое на подготовку оружия к бою и его применение либо на выполнение определенного тактического маневра;

ОВИР — общая величина изменения расстояния, которая может быть рассчитана по формуле (1.3) исходя из средних или известных конкретных значений скоростей маневрирования наших объектов и объектов противника. При более точном анализе величину

ОВИР также следует рассматривать как случайную и пользоваться при этом средними характеристиками случайных величин.

Таким образом, вероятность того, что мы получим упреждение в дальности обнаружения

$$P(L > d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \int_d^{\infty} e^{-\frac{(L-m_L)^2}{2\sigma_L^2}} dL \quad (3.82)$$

или

$$P(L > d) = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{d-m_L}{\sqrt{2}\sigma_L} \right) \right]. \quad (3.83)$$

При рассмотрении подобного рода ситуаций может быть поставлена и другая задача: каково должно быть упреждение в дальности обнаружения d противника при заданной вероятности ее получения P_3 :

$$P(L > d) \geq P_3. \quad (3.84)$$

Эта задача сводится к определению нижнего предела интеграла в формуле (3.82).

С помощью таблиц функции Лапласа ее можно решить следующим образом.

На основании формул (3.83) и (3.84) определяем

$$B = \Phi \left(\frac{d-m_L}{\sqrt{2}\sigma_L} \right) = 1 - 2P_3. \quad (3.85)$$

По абсолютному значению B из таблиц функции Лапласа [13] находим аргумент A .

С другой стороны, как видно из формул (3.83) и (3.85):

$$A = \frac{d-m_L}{\sqrt{2}\sigma_L}, \quad (3.86)$$

откуда

$$d = m_L \pm \sqrt{2}\sigma_L A. \quad (3.87)$$

Знак в формуле (3.87) определяется знаком величины B .

Если в результате произведенных расчетов окажется $d < 0$, то это значит, что с заданной вероятностью P_3 при данных условиях упреждение в дальности обнаружения цели получить невозможно.

Пример 3.3. Наш объект производит поиск объекта противника с помощью станции, имеющей среднюю дальность обнаружения $M[R_n] = m_{Rn} = 70$ км и среднее квадратическое отклонение в дальности обнаружения $\sigma_{Rn} = 15$ км. Из разведанных известно, что на объекте про-

тивника установлена станция со средней дальностью обнаружения $M[R_{\text{н}}] = m_{R_{\text{н}}} = 60$ км и средним квадратическим отклонением $\sigma_{R_{\text{н}}} = 25$ км. Определить априорную вероятность упреждения в обнаружении противника. Рассчитать вероятность получения упреждения в дальности обнаружения $d = 15$ км.

Решение.

$$m_L = M[R_{\text{н}}] - M[R_{\text{н}}] = (70 - 60) \text{ км} = 10 \text{ км};$$

$$\sigma_L = \sqrt{\sigma_{R_{\text{н}}}^2 + \sigma_{R_{\text{н}}}^2} = \sqrt{15^2 + 25^2} \text{ км} = 29.2 \text{ км};$$

$$\frac{m_L}{\sigma_L \sqrt{2}} = \frac{10}{29.2 \sqrt{2}} = 0.245.$$

Из таблиц находим

$$\Phi(0.245) = 0.276.$$

Поэтому

$$P(L > 0) = \frac{1}{2} (1 + 0.276) = 0.638;$$

$$\frac{d - m_L}{\sqrt{2} \sigma_L} = \frac{15 - 10}{\sqrt{2} \cdot 29.2} = 0.121.$$

Из таблиц находим

$$\Phi(0.121) = 0.125.$$

Поэтому

$$P(L > 15) = \frac{1}{2} (1 - 0.125) = 0.438.$$

Пример 3.4. При условиях примера 3.3 рассчитать возможную дальность упреждения d , которая может быть получена с вероятностью $P_3 = 0.3$.

Решение.

$$B = 1 - 2P_3 = 1 - 2 \cdot 0.3 = 0.4.$$

Из таблиц находим

$$A(0.4) = 0.38.$$

Поэтому

$$d = m_L + \sqrt{2} \sigma_L A = (10 + \sqrt{2} \cdot 29.2 \cdot 0.38) \text{ км} = 25.6 \text{ км}.$$

3.5.2. Оценка апостериорных вероятностей упреждения

При использовании средств технического наблюдения в боевых условиях может встретиться задача следующего содержания.

Предположим, что в некоторый момент времени мы обнаружим противника на некоторой дальности $R_{\text{по}}$. Чтобы принять решение на использование оружия, средств радиопротиводействия или осуществление боевого маневрирования, необходимо оценить, обнаружил нас противник своими средствами наблюдения или нет.

Эта задача по-прежнему может решаться путем оценки

$$L = R_{\text{но}} - R_{\text{ц}}. \quad (3.88)$$

Однако в данном случае эта разность как функция случайных аргументов будет определяться только одной случайной величиной $R_{\text{ц}}$, так как $R_{\text{но}}$ оказывается величиной не случайной (если пренебречь ошибками в определении дальности до цели). Если $L > 0$, то противник нас еще не обнаружил, если $L < 0$, то противник нас уже обнаружил. В данном случае

$$m_L = R_{\text{но}} - m_{\text{ц}} = R_{\text{но}} - m_{R_{\text{ц}}}; \quad (3.89)$$

$$\sigma_L = \sigma_{\text{ц}} = \sigma_{R_{\text{ц}}}. \quad (3.90)$$

Тогда на основании выражения (3.79) вероятность того, что в момент обнаружения противника он нас еще не обнаружил

$$P(L > 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{R_{\text{ц}}}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(L-m_L)^2}{2\sigma_{R_{\text{ц}}}^2}} dL \quad (3.91)$$

или через функцию Лапласа

$$P(L > 0) = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{m_L}{\sigma_{R_{\text{ц}}} \sqrt{2}} \right) \right], \quad (3.92)$$

а вероятность того, что он нас уже обнаружил

$$P(L < 0) = 1 - P(L > 0). \quad (3.93)$$

Если в момент обнаружения противника мы принимаем решение о том, что он нас еще не обнаружил, то вероятность ошибки в принятии данного решения будет $P(L < 0)$. Эту вероятность можно рассматривать как остаточный риск в принятии ошибочного решения в момент, когда мы цель обнаружим.

Если задаться остаточным риском P_3 в принятии ошибочного решения, то можно определить правило принятия решения.

Из формулы

$$P_3 = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{m'_L}{\sigma_{R_{\text{ц}}} \sqrt{2}} \right) \right] \quad (3.94)$$

при заданных P_3 и $\sigma_{R_{\text{ц}}}$ рассмотренным выше методом определяется m'_L .

Величина m'_L может быть рассчитана заранее (табл. 3.1). В момент обнаружения противника определяется дальность до него $R_{\text{но}}$ и вычисляется значение m_L по формуле (3.89). Тогда правило принятия решения о том, что

Таблица 3.1

P_3	$\sigma, \text{ км}$							
	5	10	15	20	25	30	35	40
0,80	-4,2	-8,3	-12,5	-16,5	-20,8	-24,9	-29,1	-33,2
0,60	-1,2	-2,5	-3,7	-5,0	-6,2	-8,7	-9,9	-10,0
0,40	+1,2	+2,5	+3,7	+5,0	+6,2	+8,7	+9,9	+10,0
0,30	+2,6	+5,2	+7,8	+10,4	+13,0	+15,2	+17,8	+20,8
0,20	+4,2	+8,3	+12,5	+16,6	+20,8	+24,9	+29,1	+33,2
0,10	+6,4	+12,9	+19,3	+25,8	+32,2	+38,7	+45,1	+51,6
0,07	+7,3	+14,6	+21,9	+29,2	+36,5	+43,8	+51,1	+58,4
0,05	+8,3	+16,7	+25,0	+33,4	+41,7	+51,1	+59,3	+66,8
0,03	+9,4	+18,8	+28,2	+37,6	+47,0	+54,0	+63,4	+75,2

в момент обнаружения противника он нас еще не обнаружил, определится неравенством

$$m_L \geq m'_L. \quad (3.95)$$

При этом остаточный риск в ошибочности принятого решения не будет превосходить P_3 .

Пример 3.5. Наш ударный объект, проникая через рубеж обороны противника, обнаружил перехватчик противника на дистанции $R_{по}=125$ км. Остаточный риск в принятии ошибочного решения $P_3=0,3$. Необходимо определить, обнаружил ли нас перехватчик противника, если известно, что на нем установлена станция с параметрами $m_{RC}=110$ км, $\sigma_{RC}=25$ км.

Решение.

Выбираем из табл. 3.1 по аргументам $P_3 = 0,3$ и $\sigma_{RC} = 25$ км величину $m'_L = +13$ км.

$$m_L = R_{по} - m_{RC} = (125 - 110) \text{ км} = 15 \text{ км}.$$

Отсюда $m_L > m'_L$.

Следовательно, мы вправе принять решение о том, что в момент обнаружения перехватчика противника противник нас еще не обнаружил. При этом остаточный риск в принятии ошибочного решения не будет превосходить 0,3.

Аналогично может быть решена и обратная задача, если поменять местами объекты (свой и противника).

Проведенное рассмотрение позволяет сделать заключение о том, что если мы располагаем некоторой исходной информацией о тактических свойствах средств наблюдения противника, то можно оценить априорную и апостериорную вероятности опережения в обнаружении. Эти оценки могут позволить более полно использовать тактические возможности средств наблюдения.

Глава 4

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТАНОВЛЕНИЯ ТАКТИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Конечный результат тактического поиска — встреча наблюдателя с целью — носит случайный характер. Это обуславливает применение для его оценки соответствующих вероятностных критериев [1, 2, 18, 22, 25, 32, 33, 39, 48—52, 59, 61]. Такими критериями, например, являются:

- вероятность встречи с целью, находящейся на определенном расстоянии и курсовом угле наблюдателя;

- вероятность вхождения цели в зону действия прибора наблюдения при различных соотношениях скоростей цели и наблюдателя;

- математическое ожидание числа целей, попадающих в зону действия прибора наблюдения при известном и неизвестном курсе цели;

- вероятность получения заданного числа контактов с целью;

- плотность вероятности вхождения целей в зону действия прибора наблюдения с различных направлений;

- законы распределения контактов относительно курса наблюдателя;

- вероятность попадания целей в определенный диапазон курсовых углов наблюдателя;

- оценка ожидаемого курса цели при встрече и другие критерии.

Рассмотрим некоторые из них.

4.1. ВЕРОЯТНОСТЬ ВСТРЕЧИ НАБЛЮДАТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ, ДВИЖУЩЕЙСЯ С ИЗВЕСТНОЙ СКОРОСТЬЮ, НО НЕИЗВЕСТНЫМ КУРСОМ ПРИ ЗАДАННОМ НАЧАЛЬНОМ МЕСТОПОЛОЖЕНИИ ЦЕЛИ

В общем случае, при строгой постановке вопроса вероятность обнаружения цели при тактическом поиске

$$P_{\text{обн}} = f(P_{\text{утк}}, P_{\text{упк}}). \quad (4.1)$$

Но, как показано в разд. 1.5, во многих случаях может быть обоснованно принято

$$P_{\text{обн}} = P_{\text{утк}} P_{\text{упк}},$$

где $P_{\text{утк}}$ — вероятность установления тактического контакта;
 $P_{\text{упк}}$ — вероятность установления приборного контакта.

Такая запись [51] означает, что обнаружение есть результат реализации не только усилий тактического, но и приборного поиска, результат последовательной реализации событий установления тактического и приборного контактов.

$P_{\text{упк}}$ зависит от технических данных прибора наблюдения, от условий наблюдения и т. п. $P_{\text{упк}} = 0 \div 1$, так как дальность обнаружения есть величина непостоянная.

Под вероятностью установления тактического контакта будем понимать вероятность попадания цели в зону действия прибора наблюдения $P_{\text{утк}} = P_{\text{п}}$.

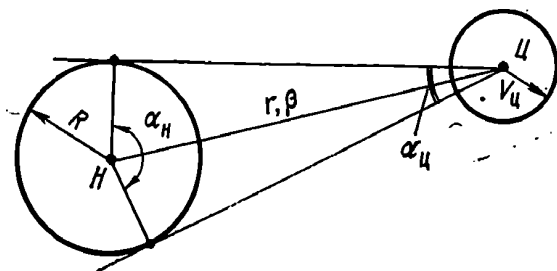


Рис. 4.1. К определению α_n и $\alpha_{\text{ц}}$ в ситуации, когда $V_n = 0$, $V_{\text{ц}} > 0$ и $K_{\text{ц}} = 0 \div 2\pi$

Рассмотрим некоторые характерные ситуации возможных встреч наблюдателя с целью при заданном относительном местоположении цели и при различных соотношениях $V_{\text{ц}}$ и V_n .

1. Наблюдатель неподвижен ($V_n = 0$); цель, находящаяся относительно наблюдателя на расстоянии r и относительном пеленге β , движется неопределенным курсом со скоростью $V_{\text{ц}}$. Дальность действия прибора наблюдения R . Вероятность попадания цели в зону действия прибора наблюдения (рис. 4.1)

$$P_{\text{п}} = \frac{\alpha_{\text{ц}}}{2\pi}. \quad (4.2)$$

где $\alpha_{\text{ц}}$ — сектор курсов цели, ведущих ее к вхождению в зону действия прибора наблюдения.

Она зависит только от r и R . Так как мы считаем $R = \text{const}$, рассмотрим зависимость P_n от расстояния до цели r (рис. 4.2).

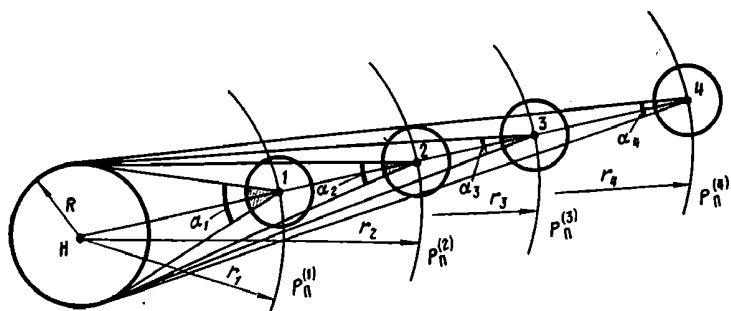


Рис. 4.2. Изменение $\alpha_n = \alpha_i$ и P_n в зависимости от r

Очевидно, если $r_1 < r_2 < r_3 < r_4$, то $P_n^{(1)} > P_n^{(2)} > P_n^{(3)} > P_n^{(4)}$.

Таким образом, с увеличением расстояния до цели вероятность обнаружения ее неподвижным прибором наблюдения уменьшается.

Можно вывести аналитическое выражение зависимости вероятности установления тактического контакта ($P_{\text{утк}} = P_n$) от расстояния до цели r и дистанции обнаружения R (рис. 4.3).

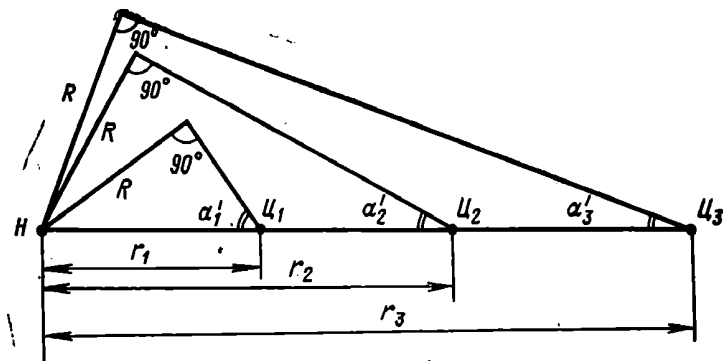


Рис. 4.3. К определению $\alpha_n = \alpha_i$ как функции R и r_i

Обозначим

$$\alpha'_i = \frac{\alpha_i}{2} = \frac{\alpha_n}{2}.$$

Из прямоугольных треугольников

$$r_l = \frac{R}{\sin \alpha_l} = \frac{R}{\sin \frac{\alpha_l}{2}},$$

откуда

$$\begin{aligned} \alpha_n &= \alpha_l = 2 \arcsin \frac{R}{r_l}, \\ P_n &= \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{R}{r_l}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

2. Поиск неподвижной цели ($V_n = 0$). Наблюдатель движется некоторым курсом со скоростью $V_n = \text{const}$.

Все цели, находящиеся впереди по курсу наблюдателя в полосе шириной $2R$, будут входить в зону действия его прибора обнаружения (рис. 4.4).

Очевидно, что если $P_{\text{упк}} = 1$, то все цели, попадающие в зону обнаружения, будут обнаружены с вероятностью $P_{\text{обп}} = 1$.

В рассмотренном случае прибор наблюдения может работать в секторном режиме $\pm 90^\circ$ в секторе $\alpha_n = \pi$. P_n в

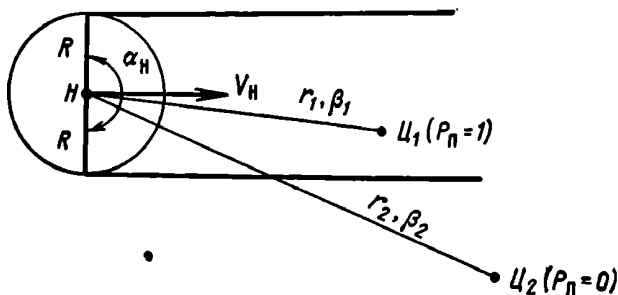


Рис. 4.4. К определению α_n и P_n в ситуации, когда $V_n \neq 0$, $K_n = \text{const}$ и $V_n = 0$

данном случае не зависит от r и обусловлена лишь размещением цели вне или в пределах полосы обследования, осматриваемой наблюдателем.

3. Цель и наблюдатель движутся. Дано относительное положение r, β цели в некоторый момент времени t . Найдём вероятность того, что цель войдет в круг радиуса R , равного дальности обнаружения с центром в точке нахождения наблюдателя, если курс цели неизвестен.

Очевидно, что P_n зависит от r, β , соотношения скоростей и направления движения цели. При $r > R$ цель попадет в круг радиусом R , тогда, и только тогда, когда вектор ее относительной скорости $\vec{V}_0$ направлен внутрь круга.

Поэтому можно определить диапазон углов $\alpha_d(r, \beta)$, при которых векторы $\vec{V}_0$ направлены в круг радиуса R (рис. 4.5). Тогда

$$P(r, \beta) = \frac{\alpha(r, \beta)}{2\pi}. \quad (4.4)$$

Так как $P(r, \beta)$ зависит от соотношения скоростей, рассмотрим 2 случая:

а) $V_n < V_u$.

Здесь

$$P_n = P(r, \beta) = \frac{\alpha(r, \beta)}{2\pi} = \frac{\alpha_u}{2\pi}. \quad (4.5)$$

Диапазон углов, при котором векторы $\vec{V}_0$ направлены в круг радиуса R , обусловлен точками пересечения окружности радиуса V_n с двумя касательными от цели к окружности радиуса R ;

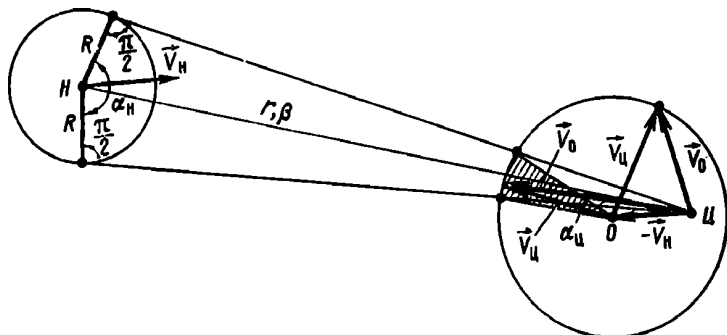


Рис. 4.5. К определению α_n и α_d в ситуации, когда $V_n < V_u$, $K_n = 0 \div 2\pi$

б) $V_n > V_u$.

Здесь

$$\left. \begin{aligned} \alpha_u &= \alpha_1 + \alpha_2; \\ P_n &= P'_n + P''_n = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2\pi}. \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

Диапазон углов α_d (рис. 4.6) оказывается многозначным: α_1 соответствует цели, движущейся к наблюдателю, α_2 — цели, движущейся от наблюдателя и догоняемой им. P'_n характеризует вероятность попадания цели в зону действия прибора наблюдения на встречных курсах наблюдателя и цели, P''_n — вероятность установления контакта с целью на курсах ее догона наблюдателем.

Для более общей характеристики возможности установления тактического контакта с целью при тех или иных ее положениях относительно наблюдателя могут быть построены эквипотенциальные линии относительного место-

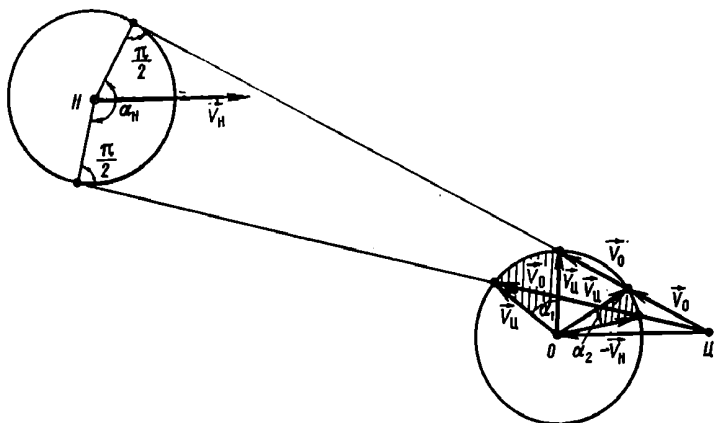


Рис. 4.6. К определению α_n , $\alpha'_u = \alpha_1$ и $\alpha''_u = \alpha_2$ в ситуации, когда $V_n > V_u$, $K_u = 0 \div 2\pi$

положения цели, характеризующие равные вероятности встречи (рис. 4.7).

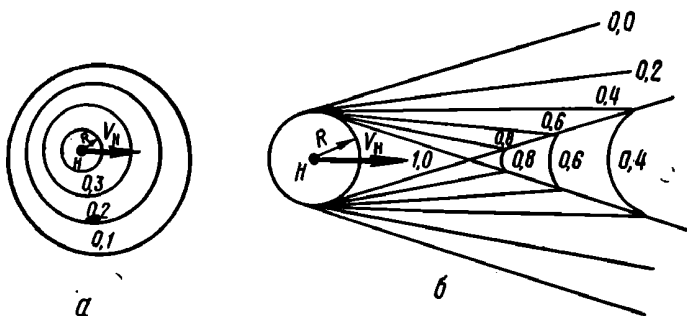


Рис. 4.7. Линии равных вероятностей вхождения цели в зону действия прибора (станции):
а — $V_n < V_u$; б — $V_n > V_u$

При $V_n < V_u$ кривые равных вероятностей попадания цели в зону действия прибора наблюдения охватывают все пространство вокруг наблюдателя. Это свидетельствует о том, что в таких ситуациях цели могут сблизиться с наблюдателем с любого направления. Однако при одном и том же расстоянии вероятности попадания для встречных

курсов всегда выше, чем вероятности попадания на курсах догона целью наблюдателя.

При $V_n > V_c$ контакты возможны лишь в определенном секторе, ограниченном критическими углами встречи. Как и в первом случае, вероятность попадания тем больше, чем меньше расстояние и чем ближе цель будет находиться к линии курса наблюдателя. Лежащая впереди по курсу наблюдателя зона 100% вероятности попадания представляет собой область неуклонения целей, движущихся со скоростью не более той, для которой построены данные эквивалентные линии.

Необходимо отметить, что линии равных вероятностей попадания одновременно являются и линиями, характеризующими одинаковое время сближения цели с наблюдателем.

4.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОЖИДАНИЕ ЧИСЛА КОНТАКТОВ ПРИ ИЗВЕСТНОМ И НЕИЗВЕСТНОМ НАПРАВЛЕНИЯХ ДВИЖЕНИЯ ЦЕЛИ

В разд. 4.1 рассматривались задачи оценки возможности установления тактического контакта как вероятности одного вхождения цели в зону действий прибора наблюдения. В других случаях, например при осуществлении контрольного поиска в районе одной или нескольких целей подвижным наблюдателем, за время поиска могут иметь место многократные контакты, т. е. многократное прохождение цели (целей) через зону действия прибора наблюдения поисковой единицы. В связи с этим возникает задача оценки математического ожидания числа контактов — среднего ожидаемого числа возможных прохождений цели (целей) через зону действия прибора наблюдения поисковой единицы. Знание этой характеристики позволит далее оценить вероятность обнаружения отдельной цели или оценить число целей, которые могут быть обнаружены за то или иное рассматриваемое время контрольного поиска.

Обычно [1, 2, 25, 32, 33, 49, 51] аналитические выражения для математического ожидания числа контактов определяют применительно к двум характерным ситуациям.

Первая ситуация. Имеется N_c целей, которые равномерно распределены по площади района поиска и характеризуются одинаковым и неизменным вектором скорости $\vec{V}_c$. Необходимо для известных площади района S_p , скорости наблюдателя V_n и для заданного времени поиска t_n оценить ожидаемое число контактов N_k .

Из всех целей, имеющих одинаковую скорость и курс, в течение рассматриваемого промежутка времени сблизятся на дальность обнаружения R только те, которые за это время попадут в круг, описанный радиусом R из точки нахождения наблюдателя, т. е. в начальный момент времени находившиеся внутри заштрихованной фигуры (рис. 4.8).

Площадь этой фигуры

$$S_{\text{обс}} = 2RV_0 t_n. \quad (4.7)$$

При плотности распределения целей

$$N = \frac{N_u}{S_p} \quad (4.8)$$

можно ожидать, что

$$N_k = \frac{2RV_0 N_u t_n}{S_p} = NS_{\text{обс}}, \quad (4.9)$$

где N_k — количество контактов за время t_n .

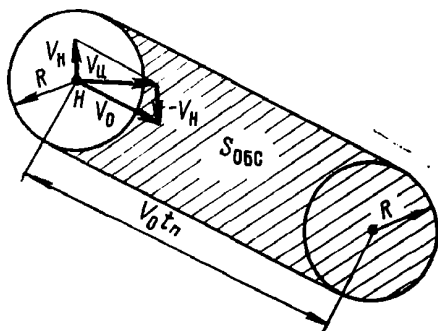


Рис. 4.8. К определению $S_{\text{обс}}$, из которой обеспечивается вхождение целей в зону действия прибора

Вторая ситуация отличается от первой тем, что курсы движения целей неизвестны и делается предположение о равномерном распределении их курсов в пределах $0-2\pi$.

Вероятность того, что разность курсов наблюдателя и цели будет лежать в пределах от Φ до $\Phi + \Delta\Phi$, равна $\frac{\Delta\Phi}{2\pi}$.

Таким образом, можно считать, что из всех целей, разность курсов которых с курсом наблюдателя лежит в этих пределах, сблизится на дальность обнаружения ΔN_k целей:

$$\Delta N_k = \frac{2RV_0 N_u t_n \Delta\Phi}{2\pi S_p}.$$

а математическое ожидание числа тактических контактов с целями, курсы которых лежат в пределах $0-2\pi$

$$\bar{N}_k = \frac{2RN_u t_n}{2\pi S_p} \int_0^{2\pi} V_o d\Phi = \frac{2RN_u t_n}{S_p} \bar{V}_o. \quad (4.10)$$

Выражение $\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_o d\Phi$ представляет собой среднюю относительную скорость $\bar{V}_o$ и преобразуется к виду

$$\bar{V}_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{V_n^2 + V_u^2 - 2V_n V_u \cos \Phi} d\Phi. \quad (4.11)$$

Выражение (4.11) может быть преобразовано [25]

$$\bar{V}_o = \frac{2(V_n + V_u)}{\pi} E\left(K, \frac{\pi}{2}\right), \quad (4.12)$$

где $E\left(K, \frac{\pi}{2}\right) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - K^2 \sin^2 \psi} d\psi$ — полный эллиптический интеграл II рода; его значение может быть найдено [7] по таблице;

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{2\sqrt{V_n V_u}}{V_n + V_u}; \\ \psi &= \frac{\pi - \Phi}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

Подставив выражение (4.12) в формулу (4.10), получим окончательное выражение для математического ожидания числа контактов

$$\bar{N}_k = \frac{4RN_u t_n}{\pi S_p} (V_n + V_u) E\left(K, \frac{\pi}{2}\right). \quad (4.14)$$

Иногда [51] вводят коэффициент K_v — параметр, учитывающий влияние неопределенности в направлении движения цели:

$$K_v = \frac{2}{\pi} E\left(K, \frac{\pi}{2}\right). \quad (4.15)$$

Значения K_v сведены в таблицы [51]. Выбрав из таблицы величину K_v , соответствующую отношению скоростей $m_u = V_n/V_u$, можно найти среднюю относительную скорость

$$\bar{V}_o = K_v (V_n + V_u) \quad (4.16)$$

и математическое ожидание числа обнаруженных целей за время поиска t_n

$$\bar{N}_k = \frac{2RN_u t_n}{S_p} K_V (V_k + V_u). \quad (4.17)$$

Из графика (рис. 4.9) видно, что при несоизмеримых скоростях ($V_n \gg V_u$; $V_n \ll V_u$) влияние K_V можно не учитывать. В [2, 22] для приближенных расчетов предлагается формула

$$\bar{V}_0 \approx \frac{V_n^2 + V_u^2}{V_k + V_u} + 0,3 \sqrt{V_n V_u}. \quad (4.18)$$

С учетом ее математическое ожидание числа контактов может быть приближенно определено по формуле

$$\bar{N}_k \approx \frac{2RN_u t_n}{S_p} \left(\frac{V_n^2 + V_u^2}{V_k + V_u} + 0,3 \sqrt{V_n V_u} \right). \quad (4.19)$$

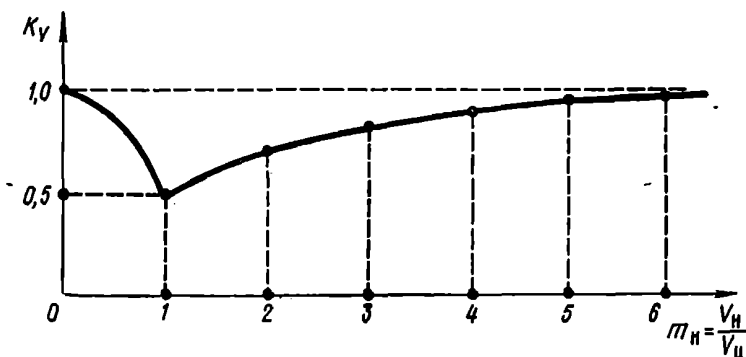


Рис. 4.9. График зависимости $K_V(m_n)$

Пример 4.1. В районе 100×100 км² действует 10 целей, расположенных случайным образом и движущихся со скоростью 10 км/ч в различных неизвестных для наблюдателя направлениях. Определить среднее ожидаемое число контактов с целями за 1 ч поиска, которое будет иметь наблюдатель, движущийся со скоростью 100 км/ч и имеющий прибор наблюдения с радиусом действия 25 км.

Решение. Определяем величину K по формуле (4.13)

$$K = \frac{2 \sqrt{V_n V_u}}{V_n + V_u} = \frac{2 \sqrt{10 \cdot 10}}{100 + 10} = 0,6.$$

По величине K из таблиц для полного эллиптического интеграла II рода [7] находим

$$E\left(K, \frac{\pi}{2}\right) = 1,4171 \approx 1,42.$$

Тогда математическое ожидание числа контактов $\bar{N}_k$ может быть определено по формуле (4.14)

$$\bar{N}_k = \frac{4RN_{ц}t_{п}}{\pi S_p} (V_n + V_{ц}) E\left(K, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{4 \cdot 25 \cdot 10 \cdot 1}{3,14 \cdot 10\,000} (100 + 10) \times \\ \times 1,42 \text{ контактов} \approx 5,0 \text{ контактов.}$$

В случае использования формулы (4.17) находим величину K_V из табл. 6 [51].

При

$$m_n = \frac{V_n}{V_{ц}} = 10 \quad K_V \approx 0,9.$$

Тогда

$$\bar{N}_k = \frac{2RN_{ц}t_{п}}{S_p} K_V (V_n + V_{ц}) = \frac{2 \cdot 25 \cdot 10 \cdot 1}{10\,000} \cdot 0,9 \cdot (100 + 10) \text{ контактов} \approx \\ \approx 5,0 \text{ контактов.}$$

При приближенной оценке $\bar{V}_0$ определяем N_k по формуле (4.19)

$$N_k = \frac{2RN_{ц}t_{п}}{S_p} \left(\frac{V_n^2 + V_{ц}^2}{V_n + V_{ц}} + 0,3 \sqrt{V_n V_{ц}} \right) = \frac{2 \cdot 25 \cdot 10 \cdot 1}{10\,000} \times \\ \times \left(\frac{10\,000 + 100}{100 + 10} + 0,3 \sqrt{100 \cdot 10} \right) \text{ контактов} = 5,1 \text{ контактов.}$$

4.3. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТАКТИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ОТНОСИТЕЛЬНО КУРСА НАБЛЮДАТЕЛЯ

4.3.1. Поиск неподвижных целей и целей, движущихся определенным курсом

Пусть наблюдатель (рис. 4.10) осуществляет поиск равномерно распределенных целей в районе, двигаясь постоянными курсом и скоростью. Необходимо определить закон распределения относительно курса наблюдателя тактических контактов, которые будет иметь наблюдатель с целями при своем движении.

а) Предположим, что наблюдатель, ведущий поиск, находится в точке 0, движется с постоянной скоростью данным курсом и ведет поиск, обнаруживая все цели, попадающие в круг радиуса R .

Закон распределения контактов относительно курса наблюдателя был бы равномерным, если бы прибор наблюдения имел зону обнаружения типа «гребенки». Но его зона обнаружения — круг, поэтому закон распределения будет неравномерным.

При относительном движении можно полагать, что движется не наблюдатель, а цель относительно неподвижного наблюдателя [1, 2, 25, 39]. При этом можно считать, что цель перемещается по линии, проходящей от наблюдателя на расстоянии l , и входит в зону его обнаружения на курсовом угле β .

Величина l является случайной, следовательно, может принимать любые значения в пределах $\pm R$. Вместе с тем $l = R \sin \beta$. Функция распределения случайной величины β :

$$F(\beta) = \frac{R+l}{2R} = \frac{R+R \sin \beta}{2R} = \frac{1}{2} (1 + \sin \beta). \quad (4.20)$$

Тогда плотность распределения контактов

$$f(\beta) = \frac{d}{d\beta} F(\beta) = \frac{1}{2} \cos \beta. \quad (4.21)$$

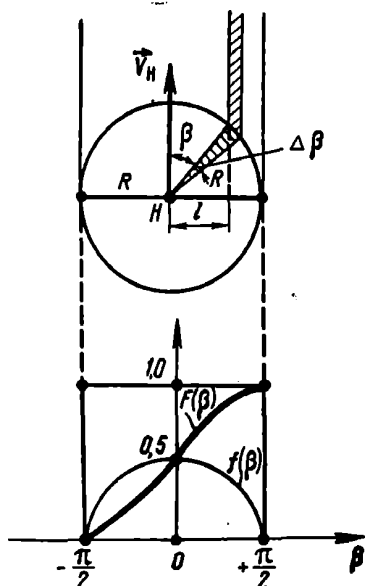


Рис. 4.10. К определению законов распределения контактов относительно курса наблюдателя с неподвижной целью

Пользуясь формулой (4.20), можно определить выражение для вероятности появления неподвижных целей в любом диапазоне курсовых углов наблюдателя

$$P(\beta_1 < \beta < \beta_2) = F(\beta_2) - F(\beta_1) = \frac{1}{2} (\sin \beta_2 - \sin \beta_1) \quad (4.22)$$

и составить табл. 4.1.

Таблица 4.1

Границы сектора наблюдения, град	± 10	± 20	± 30	± 40	± 50	± 60	± 70	± 80
Вероятность появления цели в секторе	0,17	0,34	0,50	0,64	0,77	0,87	0,94	0,98

Из таблицы видно, что нет смысла вести наблюдение в секторе $\pm 90^\circ$. Поэтому рекомендуемыми и часто применяемыми на практике секторами являются $\pm 70^\circ$, $\pm 80^\circ$.

Наибольшая вероятность контакта с целью имеет место прямо по курсу наблюдателя.

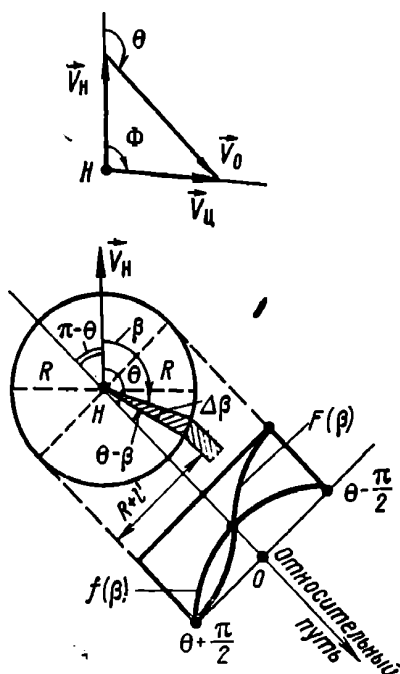


Рис. 4.11. К определению законов распределения контактов относительно курса наблюдателя с целью, движущейся определенным курсом

б) Если цель движется некоторым курсом с постоянной скоростью $V_Ц$ (рис. 4.11), все предыдущие рассуждения необходимо произвести применительно к относительному пути цели. На формулах это отразится введением относительного курса цели θ :

$$F(\beta) = \frac{R + l'}{2R} = \frac{R + R \sin(\theta - \beta)}{2R} = \frac{1}{2} [1 + \sin(\theta - \beta)], \quad (4.23)$$

где

$$\theta - \frac{\pi}{2} < \beta < \theta + \frac{\pi}{2}, \quad l' = R \sin(\theta - \beta);$$

$$f(\beta) = \frac{d}{d\beta} F(\beta) = -\frac{1}{2} \cos(\theta - \beta). \quad (4.24)$$

4.3.2. Поиск целей, движущихся неопределенным курсом

При поиске в заданном районе и при равномерном распределении целей математическое ожидание числа контактов в единицу времени под всеми курсовыми углами наблюдателя определяется из выражений (4.10) и (4.14) делением их на t_n [2, 25, 32, 33, 51]

$$\bar{N}_0 = \frac{2RN_u \bar{V}_0}{S_p} = \frac{4RN_u}{\pi S_p} (V_u + V_u) E\left(K, \frac{\pi}{2}\right).$$

Обозначим через $N = N_u/S_p$ среднюю относительную плотность целей в районе. Тогда

$$\bar{N}_0 = 2RN\bar{V}_0 = \frac{4RN}{\pi} (V_u + V_u) E\left(K, \frac{\pi}{2}\right). \quad (4.25)$$

Математическое ожидание числа контактов за время поиска t_n :

$$\bar{N}_k = \bar{N}_0 t_n = \bar{N}_0(t) \quad (4.26)$$

можно рассматривать как функцию времени и соответственно

$$\bar{N}_0 = \frac{\bar{N}_0(t)}{t_n} = \frac{\bar{N}_k}{t_n}. \quad (4.27)$$

Интенсивность (плотность вероятности) попадания целей в зону обнаружения прибора наблюдения на данном курсовом угле β за единицу времени

$$f(\beta) = \frac{\bar{N}_0(\beta)}{\bar{N}_0}. \quad (4.28)$$

так как

$$\bar{N}_0(\beta) d\beta = \bar{N}_0 f(\beta) d\beta,$$

где $\bar{N}_0(\beta) d\beta$ — математическое ожидание числа целей, движущихся различными курсами ($K_u = 0 \div 2\pi$) и попадающих за единицу времени в зону обнаружения с направления β .

В целом $\bar{N}_0$ и $\bar{N}_0(\beta)$ связаны зависимостью

$$\bar{N}_0 = \int_0^{2\pi} \bar{N}_0(\beta) d\beta. \quad (4.29)$$

Здесь $\bar{N}_0(\beta)$ выступает как функция плотности контактов. $\bar{N}_0(\beta)$ можно найти через $\bar{N}'_0(\beta)$ — функцию плотности контактов для случая определенного (известного) курса цели.

Для нахождения $\bar{N}'_0(\beta)$ построим (рис. 4.12) в точке H векторный треугольник скоростей, проведем относительный

путь цели за некоторое время t и отложим курсовые углы наблюдателя β и $\beta + d\beta$. Среди целей, направление движения которых определяется углом Φ , в промежуток между β и $\beta + d\beta$ попадут те, которые находятся на заштрихованном участке. При этом в этом случае вектор $\vec{V}_0$ направлен внутрь зоны, т. е. угол γ между вектором $-\vec{V}_0$ и единичным вектором $\vec{n}$ внешней нормали к окружности является острым (угол γ меняется от 0 до π). Угол γ определяет

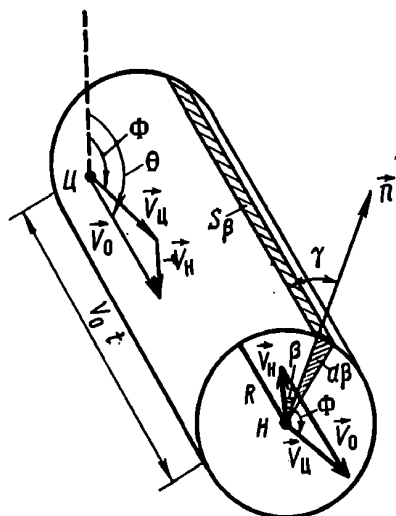


Рис. 4.12. К определению законов распределения контактов при поиске целей, движущихся неопределенным курсом

величину площади S_β в зависимости от курсового угла β , так как направление единичного вектора $\vec{n}$ зависит от β . Обозначим $dS_\beta = S'_\beta$ — площадь за единицу времени

$$S'_\beta = \frac{S_\beta}{t} = R V_0 \cos \gamma d\beta = (-\vec{V}_0 \cdot \vec{n}) R d\beta, \quad (4.30)$$

где $(-\vec{V}_0 \cdot \vec{n})$ — скалярное произведение векторов;
 $d\beta$ — в радианах.

Тогда математическое ожидание доли контактов с целями, имеющими между векторами $\vec{V}_c$ и $\vec{V}_n$ угол $\Phi \div \Phi + d\Phi$ и попадающими в зону радиусом R за единицу времени под курсовым углом β :

$$\overline{N}'_0(\beta) d\beta = S'_\beta N \frac{d\Phi}{2\pi},$$

откуда соответствующая интенсивность контактов

$$\bar{N}'_0(\beta) = \frac{NS'_\beta}{d\beta} \frac{d\Phi}{2\pi} = NR\dot{V}_0 \cos \gamma \frac{d\Phi}{2\pi}. \quad (4.31)$$

Для получения $\bar{N}_0(\beta)$ необходимо проинтегрировать $\bar{N}'_0(\beta)$ по всем возможным значениям Φ при $K_u = 0 \rightarrow 2\pi$, для которых подынтегральная функция является положительной

$$\bar{N}_0(\beta) = \frac{RN}{2\pi} \int V_0 \cos \gamma d\Phi. \quad (4.32)$$

Преобразуем подынтегральную функцию

$$V_0 \cos \gamma = (-\vec{V}_0 \cdot \vec{n}),$$

Так как $\vec{V}_0 = \vec{V}_u - \vec{V}_n$, то $V_0 \cos \gamma = \vec{V}_n \vec{n} - \vec{V}_u \vec{n}$, $\vec{V}_n \vec{n} = V_n \cos \beta$ и $\vec{V}_u \vec{n} = V_u \cos(\Phi - \beta)$.

Тогда

$$V_0 \cos \gamma = V_n \cos \beta - V_u \cos(\Phi - \beta). \quad (4.33)$$

В результате имеем

$$\bar{N}_0(\beta) = \frac{RN}{2\pi} \int [V_n \cos \beta - V_u \cos(\Phi - \beta)] d\Phi. \quad (4.34)$$

Решениями уравнения (4.34) для различных ситуаций [2, 25, 32, 33, 51] будут:

1. При $V_n \leq V_u$

$$\bar{N}_0(\beta) = \frac{RN}{\pi} \left[V_n \arccos\left(-\frac{V_n}{V_u} \cos \beta\right) \cos \beta + \sqrt{V_u^2 - V_n^2 \cos^2 \beta} \right]. \quad (4.35)$$

2. При $V_n > V_u$ возможны 3 варианта:

а) Если

$$\arccos\left(\frac{V_n}{V_u}\right) \leq \beta \leq \arccos\left(-\frac{V_n}{V_u}\right)$$

или

$$-\arccos\left(-\frac{V_n}{V_u}\right) \leq \beta \leq -\arccos\left(\frac{V_n}{V_u}\right),$$

то $\bar{N}_0(\beta)$ определяется по формуле (4.35).

б) Если

$$-\arccos\left(\frac{V_n}{V_u}\right) \leq \beta \leq \arccos\left(\frac{V_n}{V_u}\right),$$

то

$$\bar{N}_0(\beta) = RN V_n \cos \beta. \quad (4.36)$$

в) Если

$$\arccos\left(-\frac{V_u}{V_H}\right) \leq \beta \leq -\arccos\left(-\frac{V_u}{V_H}\right),$$

то

$$\bar{N}_0(\beta) = 0. \quad (4.37)$$

Подставив полученные значения $\bar{N}_0(\beta)$ в формулу (4.28), можно определить плотность вероятности контактов $f(\beta)$ на данном курсовом угле (пеленге) и построить соответствующие графики для различных условий поиска.

Анализ значений $f(\beta)$ показывает, что:

$f(\beta)$ не зависит от числа имеющихся в данном районе целей и показывает лишь относительную возможность появления их с различных направлений;

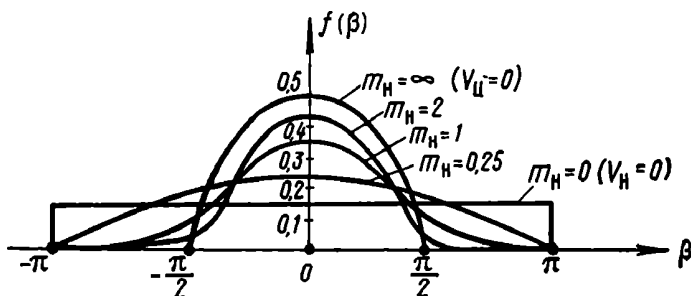


Рис. 4.13. Графики плотности распределения контактов относительно курса наблюдателя

возможность появления целей с различных направлений не зависит от абсолютных величин скоростей цели и наблюдателя, а зависит только от их соотношения;

возможность появления целей с различных направлений не зависит от расстояния, на котором ожидается появление цели.

Принципиальный вид зависимостей $f(\beta)$ показан на рис. 4.13.

Полученные аналитические зависимости позволяют оценивать интенсивность контактов с целями (равномерно распределенными по месту и курсу) и строить графики законов распределения контактов относительно курса наблюдателя. При этом при $V_H < V_d$ контакты возможны со всех направлений и расчет ведется по формуле (4.35). А в случае $V_H > V_d$ при оценке возможностей установления

контактов с целями с тех или иных направлений целесообразно рассматривать 3 характерные зоны (рис. 4.14).

а) Зона *a* лежит впереди по курсу наблюдателя и ограничена углами: от $-\arccos\left(\frac{V_{ц}}{V_{н}}\right)$ до $+\arccos\left(\frac{V_{ц}}{V_{н}}\right)$. В этой зоне интенсивность контактов оценивается по формуле (4.36). Зона *a* является зоной установления контактов с неуклоняющимися целями; интенсивность контактов в ней не зависит от скорости целей. Это объясняется тем, что все цели, с которыми устанавливаются контакты в зоне *a*, не успевают выйти из пределов области неуклонения.

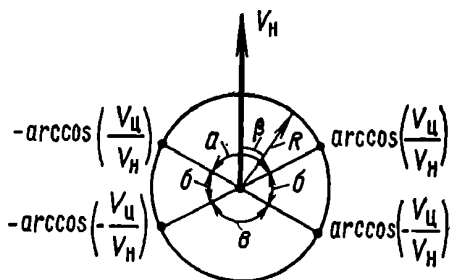


Рис. 4.14. Характерные зоны установления тактических контактов относительно курса наблюдателя

б) Зона *b* лежит соответственно с левого и правого борта и ограничена углами от $-\arccos\left(-\frac{V_{ц}}{V_{н}}\right)$ до $-\arccos\left(\frac{V_{ц}}{V_{н}}\right)$ слева и от $\arccos\left(\frac{V_{ц}}{V_{н}}\right)$ до $\arccos\left(-\frac{V_{ц}}{V_{н}}\right)$ справа; в ней расчеты должны вестись по формуле (4.35). В этой зоне контакты обусловлены как движением наблюдателя, так и движением цели. При этом для углов $\beta < \pm \frac{\pi}{2}$ контакты возможны как за счет набегания зоны радиуса *R* на цели, так и за счет вхождения целей вследствие своего движения, а при курсовых углах $\beta > \pm \frac{\pi}{2}$ контакты возможны лишь за счет вхождения целей с боковых направлений.

в) Зона *в* лежит в задней части зоны радиуса *R* и ограничена углами (по часовой стрелке) от $\arccos\left(-\frac{V_{ц}}{V_{н}}\right)$ до $-\arccos\left(-\frac{V_{ц}}{V_{н}}\right)$.

Эта зона характерна полным отсутствием контактов, так как при $V_n > V_{ц}$ все цели, находящиеся в ее пределах, не успевают войти в зону обнаружения радиуса R .

4.4. НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДХОДА И КУРСА ЦЕЛИ

4.4.1. Методы оценки ожидаемой вероятности установления контакта с целью в заданном секторе курсовых углов наблюдателя

Подобная задача может решаться, например, при выборе и назначении ответственных секторов наземным (береговым) постам наблюдения, кораблям охранения, отдельным средствам наблюдения и в других случаях.

Ожидаемая вероятность установления контакта с целью в заданном секторе курсовых углов наблюдателя в случае поиска неподвижных целей легко оценивается по формуле (4.22). Аналогично задача может быть решена и в случае потока равномерно распределенных (по площади) относительно неподвижного наблюдателя целей, когда наблюдатель неподвижен, а движется относительно него поле равномерно распределенных целей. Для первого случая, например, вероятность получения контакта с неподвижной целью в секторе от $\beta_1 = 70^\circ$ левого борта до $\beta_2 = 10^\circ$ правого борта

$$\begin{aligned} P(-70^\circ < \beta < 10^\circ) &= \frac{1}{2} [\sin 10^\circ - \sin (-70^\circ)] = \\ &= \frac{1}{2} (0,17 + 0,94) = 0,555. \end{aligned}$$

Для симметричных секторов ранее приведена табл. 4.1 значений вероятности $P(\beta_1 < \beta < \beta_2)$.

В случае подвижной цели, движущейся определенным курсом, указанную задачу решим после определения формулы для $P(\beta_1 < \beta < \beta_2)$ из формулы (4.24)

$$\begin{aligned} P(\beta_1 < \beta < \beta_2) &= \int_{\beta_1}^{\beta_2} f(\beta) d\beta = -\frac{1}{2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos(\theta - \beta) d\beta = \\ &= F(\beta_2) - F(\beta_1) = \frac{1}{2} [\sin(\theta - \beta_1) - \sin(\theta - \beta_2)]. \quad (4.38) \end{aligned}$$

Например, вероятность установления контакта с целью, движущейся относительным курсом $\theta = 135^\circ$, для сектора курсовых углов наблюдателя $\pm 45^\circ$

$$P(-45^\circ < \beta < 45^\circ) = \frac{1}{2} (\sin 90^\circ - \sin 180^\circ) = 0,5.$$

Выбранный сектор в заданной ситуации охватывает половину сектора возможных контактов с целью.

В случае движения целей неопределенным курсом ожидаемая вероятность установления контакта с целями в заданном секторе от β_1 до β_2 оценивается путем определения доли целей, с которыми контакты устанавливаются в данном секторе, по отношению ко всем целям, попадающим в зону обнаружения прибора наблюдения, по формуле

$$P(\beta_1 < \beta < \beta_2) = \int_{\beta_1}^{\beta_2} f(\beta) d\beta = \frac{1}{N_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} N_0(\beta) d\beta. \quad (4.39)$$

Однако необходимо отметить, что в данном случае выражение для $N_0(\beta)$ выбирается в зависимости от ситуации с учетом характерных зон контактов, в которые попадают границы заданного сектора.

В случае определенного курса целей формула (4.28) будет иметь вид

$$f(\beta) = \frac{N_0(\beta)}{N_0}. \quad (4.40)$$

Пример 4.2. Определить, какая часть целей из всех, попадающих за 1 ч в зону действия прибора наблюдения при контрольном поиске в районе, входит в зону в пределах сектора от $\beta_1 = -30^\circ$ до $\beta_2 = +30^\circ$, если дано: $S_p = 10\,000$ кв. миль, $N_u = 20$, $V_u = 10$ уз, $V_n = 15$ уз и $R = 25$ миль.

Решение.

Для заданного соотношения скоростей $m_u = \frac{V_u}{V_n} = 0,66$ оценим границы зоны a контактов (рис. 4.14):

$$-\arccos \frac{V_u}{V_n} = -\arccos 0,66 = -48^\circ 42';$$

$$\arccos \frac{V_u}{V_n} = \arccos 0,66 = 48^\circ 42'.$$

При соотношении $\frac{V_u}{V_n} = 0,66$ зона a охватывает сектор $\pm 48^\circ 42'$.

Следовательно, заданный сектор $\pm 30^\circ$ лежит в зоне a и расчет должен вестись с учетом формулы (4.36), тогда:

$$P(\beta_1 < \beta < \beta_2) = \frac{NRV_u}{N_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos \beta d\beta;$$

$$N = \frac{N_{\text{н}}}{S_p} = \frac{20}{10000} = 0,002;$$

$$\bar{N}_0 = \frac{4RN}{\pi} (V_{\text{н}} + V_{\text{ц}}) E\left(K, \frac{\pi}{2}\right);$$

$$K = \frac{2\sqrt{V_{\text{ц}}V_{\text{н}}}}{V_{\text{ц}} + V_{\text{н}}} = \frac{2\sqrt{10 \cdot 15}}{25} = \frac{4}{5} \sqrt{1,5} = 0,982;$$

$$K = \sin \alpha, \alpha = \arcsin K = \arcsin 0,982 = 79^\circ.$$

Находим по таблице значение полного эллиптического интеграла II рода [7]

$$E\left(K, \frac{\pi}{2}\right) = 1,047.$$

Математическое ожидание общего количества контактов в единицу времени

$$\bar{N}_0 = \frac{4 \cdot 25 \cdot 0,002}{3,14} (15 + 10) \cdot 1,047 = 1,67 \frac{\text{контактов}}{\text{ч}}.$$

Тогда вероятность получения этих контактов в секторе $\pm 30^\circ$

$$P(-30^\circ < \beta < 30^\circ) = \frac{\pi V_{\text{н}}}{4(V_{\text{н}} + V_{\text{ц}}) E\left(K, \frac{\pi}{2}\right)} \int_{-30^\circ}^{+30^\circ} \cos \beta d\beta =$$

$$= \frac{3,14 \cdot 15}{4(10 + 15) \cdot 1,047} \sin \beta \Big|_{-30^\circ}^{+30^\circ} = 0,45.$$

Таким образом, из 1,67 контактов, которые получает наблюдатель за 1 ч в данной ситуации, 45% происходят в секторе $\pm 30^\circ$, т. е.

$$1,67 \cdot 0,45 = 0,75 \frac{\text{контактов}}{\text{ч}}.$$

При задании больших секторов, охватывающих в ситуации $V_{\text{н}} > V_{\text{ц}}$ зоны a и b (полностью или частично), $P(\beta_1 < \beta < \beta_2)$ определяется как алгебраическая сумма вероятностей для каждой из зон с использованием соответствующих формул для интенсивности контактов $\bar{N}_0(\beta)$ [2, 25, 32, 33].

Однако если при решении указанной задачи для зоны a в ситуации $V_{\text{н}} > V_{\text{ц}}$ не возникает трудностей с решением

интеграла $\int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos \beta d\beta$, то для зоны b в ситуации $V_{\text{н}} > V_{\text{ц}}$

и для ситуации $V_{\text{н}} < V_{\text{ц}}$ интеграл $\int_{\beta_1}^{\beta_2} \bar{N}_0(\beta) d\beta$ не выражается через простые функции. В [25] для этих случаев выведены соотношения для $P(\beta_1 < \beta < \beta_2)$.

В ситуации $V_H \leq V_H$:

$$P(\beta_1 < \beta < \beta_2) = \frac{V_H}{4(V_H + V_H)E\left(K, \frac{\pi}{2}\right)} \left\{ \sin \beta_2 \arccos\left(-\frac{V_H}{V_H} \cos \beta_2\right) - \right. \\ \left. - \sin \beta_1 \arccos\left(-\frac{V_H}{V_H} \cos \beta_1\right) + \frac{2V_H}{V_H} [E(K_1, \varphi_1) - E(K_1, \varphi_2)] - \right. \\ \left. - \frac{V_H^2 - V_H^2}{V_H V_H} [F(K_1, \varphi_1) - F(K_1, \varphi_2)] \right\}, \quad (4.41)$$

где $K_1 = m_H = \frac{V_H}{V_H}$; $\varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \beta_1$; $\varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \beta_2$;

$F(K_1, \varphi_1)$, $F(K_1, \varphi_2)$ — неполные эллиптические интегралы I рода;

$E(K_1, \varphi_1)$, $E(K_1, \varphi_2)$ — неполные эллиптические интегралы II рода.

Значения этих интегралов выбираются из таблиц [7].

В ситуации $V_H > V_H$, поскольку функция $N_0(\beta)$ является кусочно-непрерывной, в интервалах углов

$$-\arccos\left(-\frac{V_H}{V_H}\right) < \beta < 0 \quad \text{и} \quad 0 < \beta < \arccos\left(-\frac{V_H}{V_H}\right)$$

рассматриваются три возможных варианта расчета:

$$a) -\arccos\left(\frac{V_H}{V_H}\right) < \beta < \arccos\left(\frac{V_H}{V_H}\right),$$

т. е. в пределах зоны a (рис. 4.14) расчет ведется аналогичным рассмотренному в примере 4.2 способом по формуле

$$P(\beta_1 < \beta < \beta_2) = \frac{\pi V_H}{4(V_H + V_H)E\left(K, \frac{\pi}{2}\right)} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos \beta d\beta = \\ = \frac{\pi V_H (\sin \beta_2 - \sin \beta_1)}{4(V_H + V_H)E\left(K, \frac{\pi}{2}\right)}. \quad (4.42)$$

$$б) -\arccos\left(-\frac{V_H}{V_H}\right) < \beta < -\arccos\left(\frac{V_H}{V_H}\right),$$

$$\arccos\left(\frac{V_H}{V_H}\right) < \beta < \arccos\left(-\frac{V_H}{V_H}\right),$$

т. е. в пределах зоны δ расчет ведется по формуле

$$P(\beta_1 < \beta < \beta_2) = \frac{V_{\text{н}}}{4(V_{\text{н}} + V_{\text{н}})E\left(K, \frac{\pi}{2}\right)} \times \\ \times \left\{ \sin \beta_2 \arccos\left(-\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{н}}} \cos \beta_2\right) - \sin \beta_1 \arccos\left(-\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{н}}} \cos \beta_1\right) + \right. \\ \left. + 2[E(K_2, \varphi_3) - E(K_2, \varphi_4)] - \right. \\ \left. - \frac{V_{\text{н}}^2 - V_{\text{н}}^2}{V_{\text{н}}^2} [F(K_2, \varphi_3) - F(K_2, \varphi_4)] \right\}, \quad (4.43)$$

где

$$K_2 = m_{\text{н}} = \frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{н}}}; \quad \varphi_3 = \arcsin\left(\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{н}}} \cos \beta_1\right); \\ \varphi_4 = \arcsin\left(\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{н}}} \cos \beta_2\right).$$

$$\text{в) } -\arccos\left(-\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{н}}}\right) < \beta < 0 \text{ и } 0 < \beta < \arccos\left(-\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{н}}}\right),$$

т. е. охватывает зоны a и δ .

Здесь

$$P(\beta_1 < \beta < \beta_2) = \frac{V_{\text{н}}}{4(V_{\text{н}} + V_{\text{н}})E\left(K, \frac{\pi}{2}\right)} \times \\ \times \left\{ \sin \beta_2 \arccos\left(-\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{н}}} \cos \beta_2\right) - \sin \beta_1 \arccos\left(-\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{н}}} \cos \beta_1\right) + \right. \\ \left. + 2[E(K_2, \varphi_3) - E(K_2, \varphi_4)] - \right. \\ \left. - \frac{V_{\text{н}}^2 - V_{\text{н}}^2}{V_{\text{н}}^2} [F(K_2, \varphi_3) - F(K_2, \varphi_4)] + 2\sqrt{1 - K_2^2} \right\}. \quad (4.44)$$

Для облегчения подобных расчетов можно, как это показано в [2, 25, 32, 33], составить таблицы или построить графики зависимости $P(\beta_1 < \beta < \beta_2)$ (рис. 4.15).

Приведенные методы расчета вероятности установления контакта в заданном секторе основываются на использовании зависимостей для математического ожидания числа контактов в единицу времени.

От найденного общего среднего числа контактов N_0 и доли (вероятности) контактов в заданном секторе в единицу времени $P(\beta_1 < \beta < \beta_2)$ можно перейти к подобным характеристикам за некоторое конечное время поиска $t_{\text{п}}$.

Действительно, общее среднее число контактов $\bar{N}_k$ за время поиска t_n определяется формулой (4.26). Из них в заданном секторе $\varphi_n = \beta_2 - \beta_1$

$$N_{k\varphi_n} = \bar{N}_k P(\beta_1 < \beta < \beta_2) = \bar{N}_0 t_n P(\beta_1 < \beta < \beta_2). \quad (4.45)$$

При этом в случае значительного времени поиска могут быть получены большие значения величин $\bar{N}_k$ и $\bar{N}_{k\varphi_n}$.

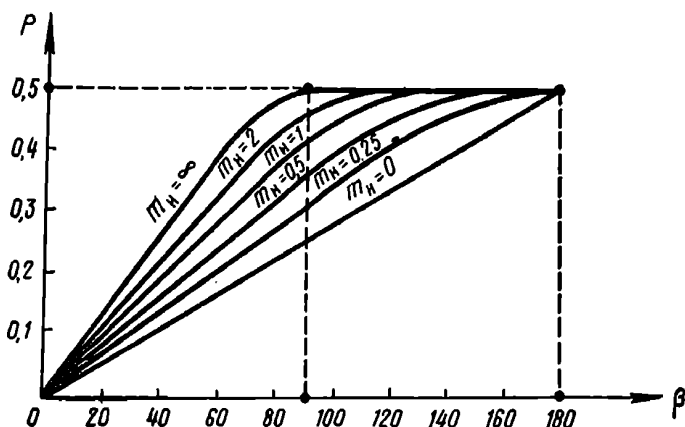


Рис. 4.15. Графики вероятностей установления тактических контактов относительно курса наблюдателя для различных m_k

превышающие общее количество целей в районе N_n . Это будет свидетельствовать о многократных контактах с теми или иными целями.

4.4.2. Методы оценки ожидаемого курса цели в зависимости от курсового угла контакта

Изложенные ниже методы оценки интенсивности распределения контактов наблюдателя с равномерно распределенными по месту и курсу целями в зависимости от соотношения скоростей и значений курсовых углов открывают некоторые возможности для ориентировочной оценки вероятного курса цели в момент установления контакта с ней как функции от $m_n = \frac{V_n}{V_n}$ и $\bar{N}_0(\beta)$. Действительно для решения подобных задач могут быть построены соответствующие графики [2, 25, 32, 33] и составлены таблицы для характеристики плотности вероятности, отражающие

зависимость между курсом цели и курсовым углом (пеленгом) контакта для различных соотношений $V_{ц}$ и $V_{н}$, используя которые, можно определить вероятный курс цели по известному курсовому углу контакта.

Плотность вероятности $\tilde{\omega}(\Phi)$ того, что (при равномерном распределении места и курса цели) угол разности курсов цели и наблюдателя будет иметь значение Φ (т. е. лежать в пределах от Φ до $\Phi + d\Phi$) при равномерном распределении возможных курсов цели в пределах от 0 до 2π , характеризуется отношением $1/2\pi$. Тогда вероятность того, что курс такой цели будет Φ (т. е. находиться в пределах от Φ до $\Phi + d\Phi$)

$$\tilde{\omega}(\Phi) d\Phi = \frac{d\Phi}{2\pi}. \quad (4.46)$$

Это известная нам до контакта вероятность. Но нас интересует плотность вероятности контакта с указанной целью на курсовом угле β . Обозначим ее $f_{\Phi}(\beta)$. Математическое ожидание числа контактов $\bar{N}'_0(\beta)$ на курсовом угле β с целями, движущимися курсом Φ , определяется формулой (4.31). А математическое ожидание общего числа контактов по всем направлениям со всеми целями, идущими курсом Φ :

$$\bar{N}'_0 = 2RV_0 N \frac{d\Phi}{2\pi}. \quad (4.47)$$

Тогда согласно формулам (4.28), (4.31) и (4.33)

$$f_{\Phi}(\beta) = \frac{\bar{N}'_0(\beta)}{\bar{N}'_0} = \frac{V_0 \cos \gamma}{2V_0} = \frac{V_n \cos \beta - V_n \cos(\Phi - \beta)}{2V_0}. \quad (4.48)$$

Полученная функция плотности вероятности контактов характеризует «действующую» в момент установления контакта вероятность результата обнаружения, т. е. получения контакта между углами β и $\beta + d\beta$, и косвенно подтверждает, что обнаруженные цели (цель) действительно имеют курс Φ относительно курса наблюдателя.

Выражение для этой вероятности будет иметь вид

$$f_{\Phi}(\beta) d\beta = \frac{V_n \cos \beta - V_n \cos(\Phi - \beta)}{2V_0} d\beta. \quad (4.49)$$

На основании имеющихся двух видов функций плотности вероятности можно говорить и о двух вероятностных оценках:

— априорная (определенная до контакта) вероятность того, что курс цели заключен между Φ и $\Phi + d\Phi$, характеризуемая выражением (4.46);

— «действующая» вероятность результата обнаружения, т. е. получения контакта между углами β и $\beta + d\beta$, означающая, что цель действительно имеет курс Φ , и характеризующая формулой (4.49).

Теперь имеется возможность для окончательного решения задачи оценки курса цели как задачи на оценку «вероятности причин», которая решается применением теоремы Байеса. В соответствии с этой теоремой определяется третья — апостериорная (т. е. определенная после контакта с целью на угле β) вероятность того, что курс цели заключен между Φ и $\Phi + d\Phi$

$$P_{\beta}(\Phi) = \frac{\tilde{\omega}(\Phi) f_{\Phi}(\beta)}{\int \tilde{\omega}(\Phi) f_{\Phi}(\beta) d\Phi}. \quad (4.50)$$

После подстановки значений $\tilde{\omega}(\Phi)$ и $f_{\Phi}(\beta)$ в выражение (4.50) будем иметь

$$P_{\beta}(\Phi) = \frac{V_n \cos \beta - V_u \cos(\Phi - \beta)}{\int [V_n \cos \beta - V_u \cos(\Phi - \beta)] d\Phi}. \quad (4.51)$$

Решение $\int [V_n \cos \beta - V_u \cos(\Phi - \beta)] d\Phi$ для различных ситуаций было рассмотрено в подразд. 4.3.2.

В [2, 25, 32, 33] даются формулы для определения $P_{\beta}(\Phi)$ в различных ситуациях.

При $V_n \leq V_u$

$$P_{\beta}(\Phi) = \frac{1}{2} \frac{\cos \beta - \frac{V_u}{V_n} \cos(\Phi - \beta)}{\cos \beta \arccos\left(-\frac{V_u}{V_n} \cos \beta\right) + \sqrt{\left(\frac{V_u}{V_n}\right)^2 - \cos^2 \beta}}. \quad (4.52)$$

При $V_n > V_u$:

а) Для зоны а (рис. 4.14)

$$P_{\beta}(\Phi) = \frac{1}{2\pi} \left[1 - \frac{V_u}{V_n} \frac{\cos(\Phi - \beta)}{\cos \beta} \right]. \quad (4.53)$$

б) Для зоны б

$$P_{\beta}(\Phi) = \frac{1}{2} \frac{\cos \beta - \frac{V_u}{V_n} \cos(\Phi - \beta)}{\cos \beta \arccos\left(-\frac{V_u}{V_n} \cos \beta\right) + \sqrt{\left(\frac{V_u}{V_n}\right)^2 - \cos^2 \beta}}. \quad (4.54)$$

в) Для зоны в

$$P_{\beta}(\Phi) = 0. \quad (4.55)$$

На основании полученных формул для $P_p(\Phi)$ могут быть составлены соответствующие таблицы и графики для различных β и $m_n = \frac{V_n}{V_n}$.

Один из таких графиков для $m_n = 1$ показан на рис. 4.16.

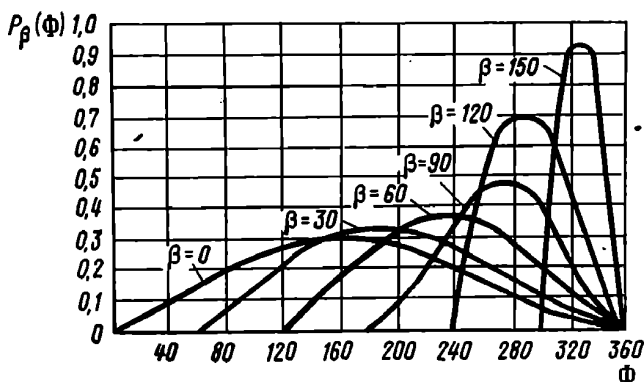


Рис. 4.16. Графики оценки возможного (ожидаемого) курса цели в зависимости от курсового угла контакта ($m_n = 1$)

4.5. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ УСТАНОВЛЕНИЯ ТАКТИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КАЧЕСТВА ПОИСКА

4.5.1. Общее понятие качества тактического поиска

Целью тактического поиска является захват объекта поиска зоной обнаружения прибора наблюдения, т. е. установление тактического контакта.

По характеру обследуемого пространства различают:

- поиск на линии (рубеже) — поиск в одномерном пространстве;
- поиск на площади (районе) — поиск в двухмерном пространстве;
- поиск в объеме (толще воздушного или водного пространства) — поиск в трехмерном пространстве.

По назначению тактический поиск подразделяется на контрольный (первичный) и перехватывающий (вторичный).

Контрольный поиск проводится для обследования заданного пространства с задачей выявить факт присутствия или отсутствия цели в районе поиска. Он может проводиться как одной, так и группой поисковых единиц, способом последовательно-параллельного обследования в об-

ширном районе или способом одновременного просмотра (осмотра) группой всей зоны поиска.

Перехватывающий поиск проводится после установления факта наличия цели в районе и уточнения ее местоположения системой контрольного поиска. Он может осуществляться различными способами охвата и перехвата цели в зоне ее вероятного местоположения. При этом, если контрольный поиск (в силу большой неопределенности информации о цели) ведется на основе гипотезы о равномерном случайном распределении цели в обширном контролируемом районе, то перехватывающий поиск (в силу наличия некоторой информации о вероятном местоположении) организуется на основе гипотезы о неравномерном случайном распределении цели в более ограниченной по размеру зоне ее вероятного местоположения. Поэтому контрольный поиск характеризуется равномерным, а перехватывающий неравномерным распределением поисковых усилий в своей зоне поиска.

Способов поиска может быть много. Каждый из них имеет свои особенности, обусловленные используемыми для поиска силами и средствами, характером района поиска цели, временем, отводимым на поиск цели, способом поиска и его организацией [2, 12, 22, 25, 49, 51, 59, 61].

Но как выбрать наиболее подходящий и эффективный способ поиска? Это может быть сделано на основе сравнения тех или иных способов по таким показателям их качества:

- $S_{\text{обс}}$ и $S_{\text{осп}}$;
- тщательность обследования зоны поиска;
- надежность выявления присутствия цели в обследуемом районе;
- темп обследования зоны поиска.

Тщательность обследования зоны поиска характеризуется ожиданием или вероятностью установления тактического контакта с целью. Например, применительно к идеальному наблюдателю, осуществляющему строго закономерное последовательно-параллельное обследование и достоверный осмотр обследуемой площади

$$P_{\text{утк}} = K_o = \frac{S_{\text{обс}}}{S_p} \quad \text{при} \quad S_{\text{обс}} \leq S_p, \quad (4.56)$$

где K_o — коэффициент покрытия, характеризующий ожидание установления контакта [39].

Надежность выявления присутствия цели в районе, т. е. надежность обнаружения цели при поиске в районе, может

быть охарактеризована при том же строго закономерном последовательно-параллельном обследовании района вероятностью обнаружения цели за одно $P_{обн}^{(1)}$ или несколько $P_{обн}^{(n)}$ обследований района поиска:

$$P_{обн}^{(1)} = P_{утк}^{(1)} P_{упк}^{(1)}; \quad (4.57)$$

$$P_{обн}^{(n)} = 1 - (1 - P_{обн}^{(1)})^n = 1 - (1 - P_{утк}^{(1)} P_{упк}^{(1)})^n, \quad (4.58)$$

где $P_{утк}^{(1)}$ и $P_{упк}^{(1)}$ — соответственно вероятности установления тактического и приборного контактов, соответственно за одно обследование района поиска и за одно прохождение цели через зону обнаружения.

Темп обследования характеризуется периодом проведения обследований зоны поиска наблюдателем.

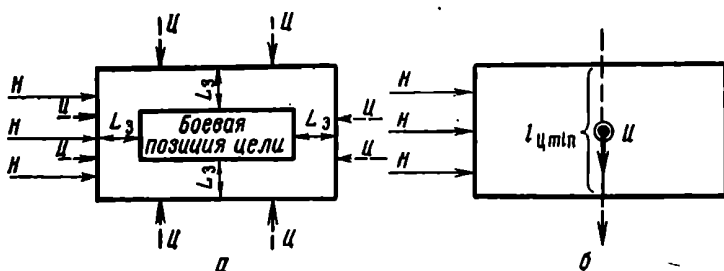


Рис. 4.17. К определению t_{oo} при $V_u \gg V_{ц}$:

а — проникновение цели на боевую позицию; б — проникновение цели через район наблюдения

Например, если контрольный поиск в районе (рис. 4.17, а) проводится в интересах недопущения на участке L_3 незаметного прохода цели в зону ее боевой позиции, то необходимый темп обследования t_{oo} может быть определен из условия

$$L_3 \geq V_{ц} t_{oo}.$$

Откуда

$$t_{oo} \leq \frac{L_3}{V_{ц}}. \quad (4.59)$$

Если контрольный поиск в районе (рис. 4.17, б) имеет задачу исключить незаметный проход цели через район глубиной L_1 , величина темпа обследования и освещения может быть определена из условия

$$l_{u min} \geq V_{ц} t_{oo}.$$

Откуда

$$t_{00} \leq \frac{l_{ц min}}{V_{ц}}, \quad (4.60)$$

где $l_{ц min}$ — минимальная длина траектории движения цели в зоне контрольного поиска ($l_{ц min} = L_1$).

Указанные простейшие соотношения для определения t_{00} практически справедливы лишь при $V_{ц} \gg V_{ц}$ и приведены только для иллюстраций принципа расчета.

Приведенное рассмотрение еще раз подтверждает тот факт, что эффективность обнаружения цели является функцией качества тактического и приборного поиска.

4.5.2. Виды поиска в зависимости от его качества.

Основные законы установления тактического контакта

В теоретических обоснованиях математических моделей тактического поиска в зависимости от их качества в части обеспечиваемой ими тщательности обследования района

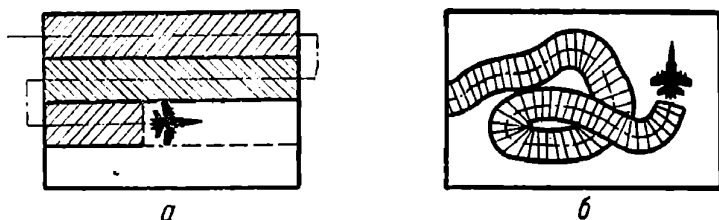


Рис. 4.18. Виды поиска по их качеству:
а — закономерный; б — случайный

поиска различают два крайних по эффективности вида поиска [2, 12, 18, 22, 25, 32, 39, 49, 52, 59, 61]:

- идеальный закономерный поиск;
- чисто случайный поиск (рис. 4.18).

Для простоты рассмотрим тот и другой виды поиска применительно к контрольному поиску неподвижной равномерно распределенной по площади района цели.

Идеальный закономерный поиск основывается на строго упорядоченном однослойном обследовании, обеспечивающем достоверный просмотр всей площади района поиска.

В общем случае, когда $S_{обс} \geq S_p$, формула (4.56) принимает вид [61]

$$P_{утк} = \min \left[\frac{S_{обс}}{S_p}; 1 \right]. \quad (4.61)$$

Эта формула выражает линейный закон нарастания вероятности установления тактического контакта (рис. 4.19, а). Вероятность контакта растет пропорционально росту обследуемой в процессе поиска площади района до тех пор, пока $S_{обс}$ не будет равна S_p .

В случае определенной дальности действия R_d прибора наблюдения поисковой единицы за ширину полосы обнаружения цели может быть принята величина $2R_d$, тогда

$$S_{обс} = 2R_d V_n t_n, \quad (4.62)$$

$$P_{утк} = \frac{2R_d V_n t_n}{S_p} \quad \text{при} \quad 2R_d V_n t_n \leq S_p, \quad (4.63)$$

где t_n — продолжительность поиска.

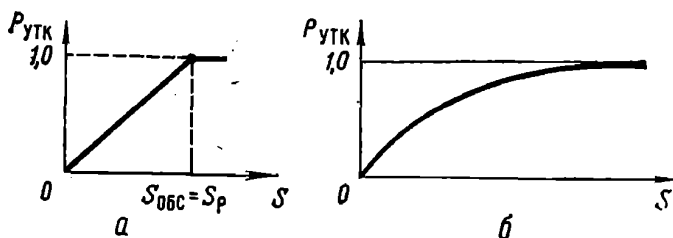


Рис. 4.19. Законы установления тактического контакта:
а — линейный; б — экспоненциальный

В этом случае, так как $P_{утк} = 1$, то $P_{утк} = P_{обн}$, т. е. эта вероятность будет характеризовать не только вероятность встречи с целью, но и вероятность ее обнаружения прибором наблюдения.

В более общем случае неопределенной дальности обнаружения цели вместо $2R_d$ за ширину полосы обнаружения должна быть принята величина W или $2R_n$. Тогда в неопределенных физических условиях

$$S_{обс} = W V_n t_n, \\ \bar{P}_{утк} = \bar{P}_{обн} = \frac{W V_n t_n}{S_p} \quad \text{при} \quad W V_n t_n \leq S_p \quad (4.64)$$

или

$$S_{обс} = 2R_n V_n t_n, \\ P_{утк} = P_{утк \max} = \frac{2R_n V_n t_n}{S_p} \quad \text{при} \quad 2R_n V_n t_n \leq S_p. \quad (4.65)$$

В последнем случае $P_{утк}$ характеризует только вероятность тактического контакта (контакта встречи наблюда-

теля с целью), а вероятность обнаружения цели будет определяться с учетом $P_{\text{упк}}$:

$$P_{\text{обн}} = P_{\text{утк}} P_{\text{упк}} = P_{\text{утк max}} P_{\text{упк}} \quad (4.66)$$

и общее выражение для среднего значения вероятности обнаружения цели при идеальном тактическом поиске в районе

$$\bar{P}_{\text{обн}} = P_{\text{утк max}} \bar{P}_{\text{упк}} = \frac{2R_{\text{п}} V_{\text{п}} t_{\text{п}}}{S_{\text{р}}} \frac{W}{2R_{\text{п}}} = \frac{W V_{\text{п}} t_{\text{п}}}{S_{\text{р}}}. \quad (4.67)$$

Анализ полученных формул показывает, что при идеальном по качеству тактическом поиске в районе изменение вероятности обнаружения цели может происходить лишь за счет изменения $P_{\text{упк}}$.

Чисто случайный (хаотический) поиск осуществляется по произвольно меняющейся случайным образом траектории движения наблюдателя (рис. 4.18, б). Данный вид поиска является наименее эффективным по качеству обследования района поиска.

При этом виде поиска площадь обследования случайно распределена внутри площади района, а некоторые участки района поиска могут быть обследованы несколько раз, некоторые вообще не обследованы.

В этом случае формула для $P_{\text{утк}}$ не может быть выведена из очевидных геометрических соображений. Формула для нарастающей вероятности установления тактического контакта при случайном поиске выводится на основе использования теоремы о среднем пути свободного пробега [39]. При этом $P_{\text{утк}}$ определяется как вероятность столкновения одного объекта (наблюдателя), движущегося хаотически, с другим (целью), местоположение которого случайным образом равномерно распределено по площади района поиска.

Изменение подобной вероятности в процессе поиска цели характеризуется экспоненциальной зависимостью (рис. 4.19, б)

$$P_{\text{утк}} = 1 - \exp(-K_0) = 1 - \exp\left(-\frac{S_{\text{обс}}}{S_{\text{р}}}\right) = 1 - e^{-\frac{S_{\text{обс}}}{S_{\text{р}}}}. \quad (4.68)$$

Как и при закономерном поиске, $S_{\text{обс}} = 2R_{\text{д}} V_{\text{п}} t_{\text{п}}$ — при определенных и $S_{\text{обс}} = W V_{\text{п}} t_{\text{п}}$ — при неопределенных физических условиях.

При случайном поиске происходит более медленное и затухающее нарастание вероятности установления тактического контакта.

Эффективность случайного поиска низка из-за низкого качества обследования района.

Сравнительная характеристика эффективности рассмотренных двух видов поиска (ИЗП и ЧСП) показана на рис. 4.20.

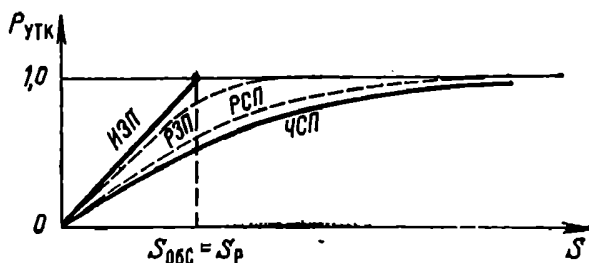


Рис. 4.20. Кривые эффективности различных видов поиска

Реальный поиск, т. е. поиск, осуществляемый на практике, занимает по своему качеству промежуточное положение между идеальным и случайным и его эффективность иллюстрируется промежуточными кривыми.

В зависимости от качества поиска кривая закона установления тактических контактов при реальном поиске при благоприятных условиях может приближаться к линии идеального закономерного поиска (ИЗП), а при неблагоприятных — к кривой чисто случайного поиска (ЧСП). Таким образом, можно различать и такие виды поиска, как реальный закономерный поиск (РЗП) и реальный случайный поиск (РСП).

Глава 5

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И РАСЧЕТА. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Мы рассмотрели методы и модели оценки эффективности при приборном и тактическом поиске применительно к одному наблюдателю, т. е. для систем наблюдения, состоящих из одного элемента (одного средства наблюдения, одной поисковой единицы).

Теперь рассмотрим системы наблюдения, состоящие из двух и более элементов, составляющих систему неподвижных или подвижных средств поиска и обнаружения и образующих линии и поля наблюдения, и определим основные принципы построения и расчета таких систем и методы оценки эффективности в определенных и неопределенных ситуациях на основе характеристик эффективности, полученных в предыдущих главах.

5.1. ЛИНИИ НАБЛЮДЕНИЯ ИЗ НЕПОДВИЖНЫХ СРЕДСТВ

Линии (рубежи) наблюдения из неподвижных средств являются одними из наиболее характерных видов многоэлементных позиционных систем наблюдения, используемых для обнаружения различных воздушных и морских целей, например [31, 57].

При этом могут различаться стационарные (длительно используемые) и маневренные (кратковременно используемые) системы.

Для конкретных ситуаций при использовании, например, кратковременно действующих систем в случае, когда ожидаемая дальность действия средств обнаружения точно известна, за радиус зоны обнаружения средств может быть

принята величина R , а для длительно действующих систем — величина R_0 , найденная применительно к возможному диапазону изменения условий наблюдения за рассматриваемое время использования системы. Тогда в том и другом случае на основе характеристик R и R_0 могут быть произведены построение и расчет рубежа из одной линии средств обнаружения исходя из требуемой минимальной глубины.

5.1.1. Линии наблюдения заданной минимальной глубины

В случае определенной дальности действия R расчет системы наблюдения может быть произведен на основе схемы построения, показанной на рис. 5.1, 1.

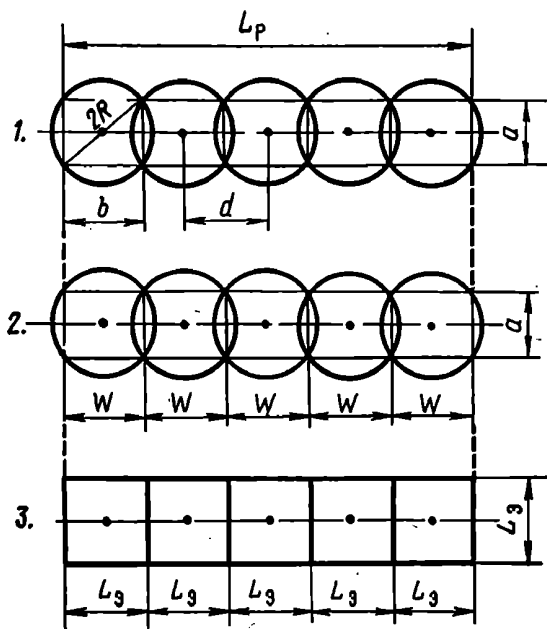


Рис. 5.1. Схемы построения линий наблюдения с использованием характеристик R , W и L_3 :

a — требуемая минимальная глубина полосы наблюдения; b — ширина позиции наблюдения, отведенная одному наблюдателю (средству); d — интервал между наблюдателями (средствами)

Для удобства расчетов величины b , d и R связывают между собой с помощью соответствующего коэффициента k , характеризующего растянутость позиции, ее относитель-

ную ширину по сравнению с шириной полосы захвата (обнаружения) $2R$:

$$b = d = 2Rk; \quad (5.1)$$

$$k = \frac{b}{2R} = \frac{d}{2R}. \quad (5.2)$$

Иногда применяют коэффициент k' :

$$k' = \frac{1}{k} = \frac{2R}{b} = \frac{2R}{d}. \quad (5.3)$$

k' характеризует плотность наблюдения (поиска)

$$b = d = \frac{2R}{k'}. \quad (5.4)$$

Из рис. 5.1, 1 следует

$$k = \sqrt{1 - \frac{a^2}{4R^2}}. \quad (5.5)$$

Величина R известна, а величина a может быть определена исходя из величины необходимого общего времени t_n наблюдения за целью, прорывающей линию (рубеж) наблюдения.

Величина t_n может характеризовать суммарные затраты времени (Σt_i), необходимого, например, для обнаружения ($t_{обн}$), опознавания ($t_{опз}$), классификации ($t_{кл}$), определения координат ($t_{ок}$) и элементов движения ($t_{эд}$) цели, а в некоторых случаях и для наблюдения и слежения ($t_{нс}$) за целью, т. е. $t_n = \Sigma t_i = t_{обн} + t_{опз} + t_{кл} + t_{ок} + t_{эд} + t_{нс}$. А зная величину k , легко определить величину позиции одного наблюдателя

$$L_n = b = 2Rk \quad (5.6)$$

и необходимое для построения линии длиной L_p количество средств (постов) наблюдения

$$N = \frac{L_p}{L_n} = \frac{L_p}{2Rk} = \frac{L_p}{2R \sqrt{1 - \frac{a^2}{4R^2}}} = \frac{L_p}{\sqrt{4R^2 - a^2}}. \quad (5.7)$$

Можно решить и обратную задачу по определению величин a и t_n для заданных значений R , L_p и N .

5.1.2. Эффективные линии наблюдения

Изложенная методика позволяет рассчитывать системы, состоящие из цепи средств (постов), образующих линию наблюдения, в случае, когда известна дальность действия

средств обнаружения, например при использовании кратковременно действующих систем в известных условиях.

В неопределенных ситуациях, например при использовании длительно действующих систем наблюдения, вместо R может быть использована величина R_0 , рассчитанная применительно к рассматриваемому диапазону условий наблюдения за время использования системы. Методика расчета системы остается прежней.

При неопределенности других параметров (например, $V_{ц}$ и $t_{ц}$) могут быть также применены их средние значения ($\bar{V}_{ц}$ и $\bar{t}_{ц}$).

Кроме того, для расчетов рассматриваемых систем наблюдения в неопределенных ситуациях (например, при использовании позиционных систем долговременного действия и при использовании в неопределенных физических условиях систем кратковременного действия) могут быть применены и такие характеристики средней эффективности средств наблюдения, как W и L_0 .

Применение этих характеристик значительно упрощает построение и расчет линий наблюдения, предназначенных для использования в неопределенных ситуациях. Например, для построения так называемой эффективной линии наблюдения длиной L_p , состоящей из средств обнаружения с эффективной длиной W позиции наблюдения (рис. 5.1, 2), потребуется

$$N = \frac{L_p}{W} \quad (5.8)$$

средств обнаружения.

Такая линия наблюдения с учетом всех допущений, связанных с определением величины W и с неопределенностью физических условий, будет обеспечивать обнаружение цели с вероятностью, близкой к единице. И это утверждение тем ближе к истине, чем уже диапазон неопределенности рассматриваемых условий наблюдения.

В пределе, когда условия изучены весьма тщательно и неопределенность может быть исключена (т. е. когда неопределенная ситуация сводится к определенной и $W = 2R$), рассчитанная таким образом эффективная линия наблюдения будет обеспечивать достоверное обнаружение цели.

Именно в этом смысле рассчитываемые с помощью эффективных характеристик R_0 , W и L_0 системы наблюдения могут рассматриваться как эффективно действующие в средних по качеству условиях линии наблюдения.

Еще проще (рис. 5.1, 3) выглядит построение эффективной линии наблюдения с использованием характеристики

L_3 . Рассчитываемая таким образом линия наблюдения имеет одинаковые и равные L_3 глубину и длину позиции наблюдения. Среднее время наблюдения за целью, обеспечиваемое такой системой,

$$t_n = \frac{L_3}{V_n}, \quad (5.9)$$

а необходимое количество постов (средств)

$$N = \frac{L_p}{L_3}. \quad (5.10)$$

5.2. ЛИНИИ НАБЛЮДЕНИЯ ИЗ ПОДВИЖНЫХ СРЕДСТВ

Системы в виде линий (рубежей) наблюдения, состоящие из подвижных наблюдателей (например, самолетов дозора и разведки), широко используются для обнаружения наземных, надводных и даже воздушных целей [45].

Расчеты таких систем также проводятся как для определенных, так и для неопределенных ситуаций. Применительно к неопределенным ситуациям это также будет соответствовать расчету так называемых эффективных систем наблюдения.

Кроме того, при построении и расчете систем, состоящих из подвижных средств, необходимо учитывать вид и характер движения наблюдателей (например, патрулирование на общей или раздельных позициях, согласованное или несогласованное маневрирование, маневрирование на линии, по схеме «петли» — периметру прямоугольника, по «восьмерке» и др.), поскольку они сильно влияют на эффективность обнаружения цели и обуславливают специфику расчета подобных систем.

5.2.1. Патрулирование наблюдателей на общей позиции

В принципе патрулирование на общей позиции может осуществляться одновременно двумя и более наблюдателями (поисковыми единицами); при этом могут быть использованы способы патрулирования на линии или по периметру прямоугольника (по схеме «петли»).

Патрулирование на линии (рис. 5.2, а) наиболее характерный вид патрулирования не только одиночного, но и группы наблюдателей [2, 22, 25, 48, 51]. Наблюдатели движутся друг за другом, строго сохраняя заданный интервал, по схеме так называемой «замкнутой цепи». Величина интервала l_n (для сохранения неразрывности замкну-

той цепи наблюдателей) должна быть равна длине пути l_r , проходимого наблюдателем за время проникновения цели $l_{ц}$. Значит, должно быть

$$t_{п} = t_{ц}; \quad t_{п} = \frac{l_{п}}{V_{п}} = \frac{l_r}{V_{п}}; \quad t_{ц} = \frac{2R}{V_{ц}},$$

здесь $t_{п}$ — время прохождения интервала между наблюдателями.

Отсюда

$$\frac{l_r}{V_{п}} = \frac{2R}{V_{ц}},$$

$$l_{п} = l_r = 2R \frac{V_{п}}{V_{ц}} = 2Rm_{ц}. \quad (5.11)$$

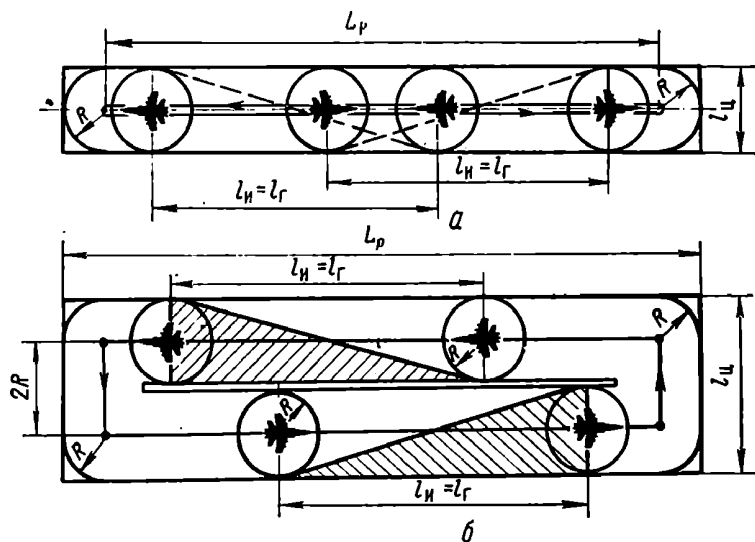


Рис. 5.2. Схемы патрулирования наблюдателей:
а — на линии рубежа; б — по периметру прямоугольника (схема «петли»)

Такая система обеспечивает непрерывное двукратное обследование полосы размером $2RL_p$ и получение за время проникновения цели двух контактов с нею, в каком бы участке рубежа она ни проникала.

Учитывая наличие встречных движений поисковых единиц в замкнутой цепи наблюдателей, патрулирующих на линии, для получения одного контакта с целью можно принять $l_{п} = 2l_r$.

Тогда необходимое число наблюдателей для патрулирования линии длиной L_p :

$$N = \frac{2L_p}{l_n} = \frac{2L_p}{4Rm_n} = \frac{L_p}{2Rm_n}. \quad (5.12)$$

Патрулирование по периметру прямоугольника применяется в случаях, когда необходимо увеличить глубину наблюдения; так, например, патрулирование по схеме «петли» (рис. 5.2, б), когда малая сторона прямоугольника равна $2R$, позволяет вдвое увеличить глубину рубежа наблюдения по сравнению с патрулированием на линии.

Для иллюстрации принципов построения и расчета такой системы наблюдения рассмотрим систему в виде цепи из четырех наблюдателей, маневрирующих по схеме «петли», имеющей длину $2l_r$ и ширину $2R$. Такая система обеспечивает создание рубежа наблюдения глубиной $4R$ и длиной $L_p = 2l_r + 2R$.

На рис. 5.2, б показана несколько упрощенная схема зон установления контактов с целью для двух из четырех наблюдателей при их движении вдоль длинных сторон петли. Эта схема справедлива для $V_n \gg V_{ц}$, т. е. для ситуации, когда использование подвижных наблюдателей становится существенно выгодным. Для этого случая также $t_n = t_{ц}$ и

$$t_n = \frac{2l_r}{V_n}; \quad t_{ц} = \frac{4R}{V_{ц}}.$$

Приравнивая правые части и учитывая, что $l_n = l_r$, получим:

$$\frac{2l_r}{V_n} = \frac{4R}{V_{ц}}; \quad l_n = l_r = 2R \frac{V_n}{V_{ц}} = 2Rm_n. \quad (5.13)$$

Такая система обеспечивает непрерывное сплошное обследование полосы размером $4R(2l_r + 2R)$ и получение за рассматриваемое время двух контактов с целью.

Для системы наблюдения, которая должна обеспечить получение лишь одного контакта с целью за время ее проникновения через рубеж

$$l_n = 2l_r = 4R \frac{V_n}{V_{ц}} = 4Rm_n. \quad (5.14)$$

Тогда необходимое число наблюдателей

$$N = \frac{2(L_p - 2R) + 2 \cdot 2R}{l_n} = \frac{L_p}{2Rm_n}. \quad (5.15)$$

Полученная формула аналогична формуле (5.12). Это свидетельствует о том, что с точностью принятых ранее

допущений переход с линейного патрулирования на петлевое не требует увеличения наряда поисковых сил, хотя и обеспечивает двойное увеличение глубины наблюдения. Аналогичным образом могут быть выведены соответствующие зависимости для расчета системы наблюдения в виде рубежа из одного или нескольких подвижных средств при маневрировании наблюдателей по способу «восьмерки» [2, 48, 51].

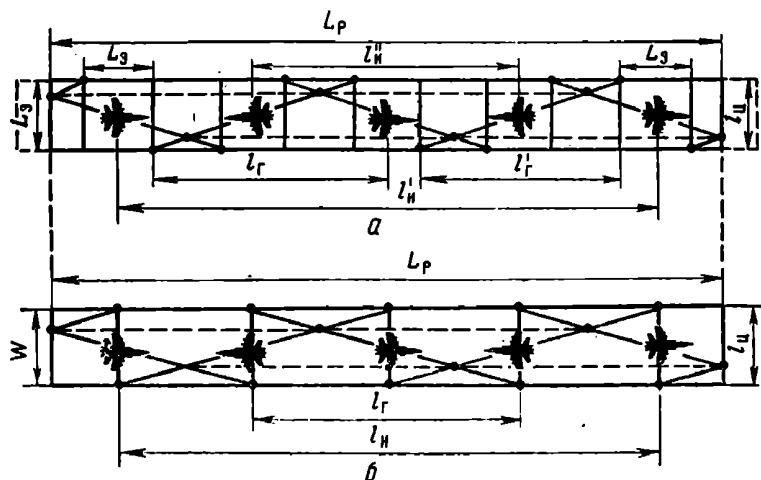


Рис. 5.3. Построение рубежа наблюдения с использованием характеристик L_3 и W

Рассмотрим некоторые методики расчета и так называемых эффективных систем наблюдения для неопределенных ситуаций.

При этом, как и для систем из неподвижных средств, построение и расчет эффективных систем должны проводиться на основе использования характеристик R_a , L_3 и W .

При расчете эффективной системы наблюдения с использованием характеристики R_a необходимо в изложенной методике R заменить R_a .

При использовании характеристики L_3 (рис. 5.3, а) считается, что система обеспечивает обследование полосы размером L_3 , L_p . При этом

$$l_r = l'_r + \frac{L_3}{2}.$$

Условие непропуска цели каждым наблюдателем:

$$\frac{l'_r}{V_n} = \frac{L_s}{V_u},$$

откуда

$$l'_r = \frac{V_u}{V_n}, \quad L_s = m_n L_s;$$

$$l_r = L_s \left(m_n + \frac{1}{2} \right). \quad (5.16)$$

Для сохранения непрерывности цепи, при которой обеспечивается получение двух контактов с целью за время ее проникновения, должно быть

$$l_n = l''_n = l'_r + L_s = m_n L_s + L_s = L_s (m_n + 1), \quad (5.17)$$

а для получения одного контакта

$$l_n = l'_n = 2l'_r + 2L_s = 2L_s (m_n + 1). \quad (5.18)$$

Тогда необходимое число наблюдателей

$$N = \frac{2L_p}{l_n} = \frac{L_p}{L_s (m_n + 1)}. \quad (5.19)$$

Еще проще рассчитывается эффективная система наблюдения при использовании характеристики W (рис. 5.3, б):

$$\frac{l_r}{V_n} = \frac{W}{V_u}; \quad l_r = \frac{V_u}{V_n} W = m_n W. \quad (5.20)$$

Для получения одного контакта

$$l_n = 2l_r = 2m_n W. \quad (5.21)$$

Следовательно,

$$N = \frac{2L_p}{l_n} = \frac{L_p}{m_n W}. \quad (5.22)$$

5.2.2. Патрулирование наблюдателей на отдельных позициях

Рассмотрим системы, образованные сочлененными между собой отдельными позициями, на которых наблюдатели (поисковые единицы) могут вести поиск как согласованно по той или иной единой схеме маневрирования, так и несогласованно, маневрируя по единым или различным схемам.

Несогласованное патрулирование наблюдателей на отведенных им позициях является наиболее легко реализуе-

мым и часто встречающимся способом организации системы наблюдения на рубеже, состоящем из нескольких состыкованных между собой позиций наблюдения, на каждой из которых наблюдатель действует самостоятельно, патрулируя по той или иной схеме маневрирования, не образуя свое маневрирование с маневрированием наблюдателей, действующих на других позициях рубежа.

При такой схеме организации поиска на рубеже можно рассматривать рубеж в целом состоящим из совокупно-

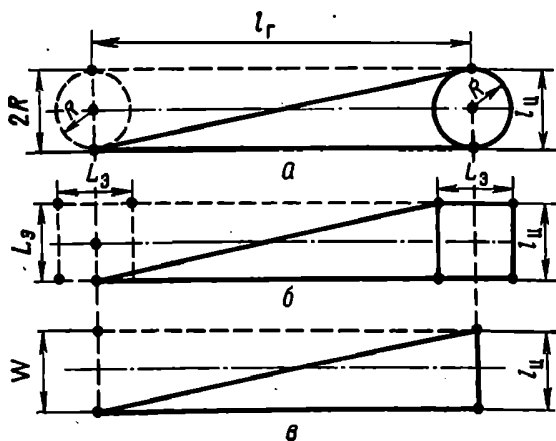


Рис. 5.4. Определение l_r с использованием характеристик:

$a - R$; $б - L_3$; $в - W$

сти N равных позиций наблюдения, на каждой из которых действует отдельный наблюдатель.

Из этого следует, что расчет подобной системы сводится к определению размера позиции патрулирования L_n одного наблюдателя и вычислению необходимого количества наблюдателей (L_p/L_n). Если при расчете системы пренебречь влиянием эффекта перекрытия зон обследования на стыках позиций смежных наблюдателей, то, естественно, принять (рис. 5.4, а) за L_n ширину (размер позиции одного наблюдателя по фронту) величину l_r . Тогда в общем случае для обеспечения контакта (непропуска цели) должно быть соблюдено соотношение

$$\frac{l_r}{V_n} = \frac{L_n}{V_n} = \frac{l_n}{2V_{ц}}.$$

откуда

$$l_r = L_n = -\frac{V_n}{2V_u} l_u = \frac{m_n}{2} l_u. \quad (5.23)$$

Наблюдатель за время проникновения цели должен проделать на своей позиции путь $2l_r$ (туда и обратно). Величина проникновения цели может быть определена, как обычно:

— для определенных ситуаций $l_n = 2R$,

— для неопределенных ситуаций (при расчете эффективных систем наблюдения) в зависимости от выбранной характеристики эффективности $l_n = 2R_0$ (рис. 5.4, а); $l_n = L_0$ (рис. 5.4, б); $l_n = W$ (рис. 5.4, в).

Необходимое количество наблюдателей для формирования рубежа длиной L_p во всех случаях

$$N = \frac{L_p}{L_n} = \frac{L_p}{l_r}. \quad (5.24)$$

Для определенных ситуаций

$$N = \frac{L_p}{m_n R}. \quad (5.25)$$

Для неопределенных ситуаций

$$N = \frac{L_p}{m_n R_0}, \quad (5.26)$$

$$N = \frac{2L_0}{m_n L_0} \quad (5.27)$$

или

$$N = \frac{2L_p}{m_n W}. \quad (5.28)$$

При необходимости величину L_n можно определять по формулам:

$$L_n = l_r + 2R, \quad (5.29)$$

$$L_n = l_r + 2R_0, \quad (5.30)$$

$$L_n = l_r + L_0. \quad (5.31)$$

Однако при этом необходимо иметь в виду, что увеличение L_n приведет к понижению достоверности установления контактов на стыках позиций наблюдений.

При согласованном патрулировании наблюдателей по так называемой схеме «все вдруг» расчет системы может быть в принципе произведен так же, как и при несогласованном патрулировании, обладающем такой же эффективностью.

Следует отметить, что способ совместного согласованного патрулирования на общей позиции более выгоден, так как в принципе он требует для своей реализации вдвое меньше средств наблюдения. Поэтому при наличии соответствующих возможностей предпочтительно организовывать согласованное патрулирование не на отдельных, а на общей позиции.

При более строгом рассмотрении и исследовании поиска на общей позиции, например методами [22, 48, 51], при изменении интервала от $l_n = l_r$ до $l_n = 2l_r$ в действительности происходит уменьшение достоверности контакта

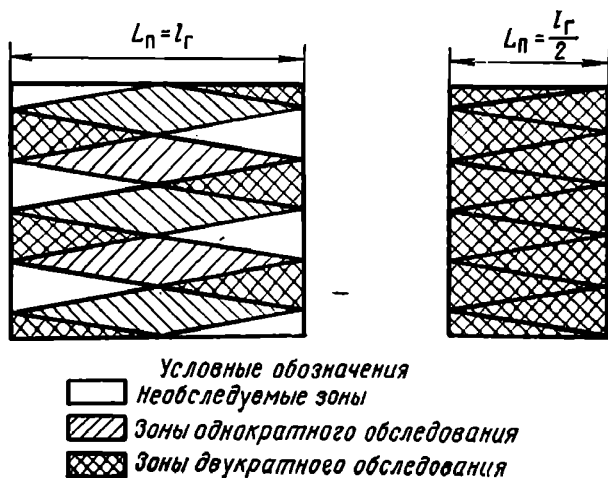


Рис. 5.5. Схема образования характерных зон установления тактических контактов

вследствие нарушения равномерности обследования различных участков рубежа. При этом вместо единой сплошной зоны равномерного однократного обследования всего рубежа возникают три зоны:

— необследуемые зоны — зоны несобнаружения цели, составляющие 25% площади рубежа;

— зоны однократного обследования — однократного обнаружения цели, составляющие 50% площади рубежа;

— зоны двукратного обследования — двукратного обнаружения цели, составляющие 25% площади рубежа (рис. 5.5).

В результате общая вероятность установления контакта на обследуемой площади падает при $l_{II}=2l_I$ до $3/4$, при $l_{II}=3l_I$ до $5/9$, при $l_{II}=4l_I$ до $7/16$.

5.3. ПОЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ИЗ СТАЦИОНАРНЫХ СРЕДСТВ

Поля наблюдения, как и рубежи наблюдения,— широко распространенный вид позиционных многоэлементных систем наблюдения. Они могут создаваться, например, для обнаружения воздушных и подводных целей и для наблюдения за ними [9, 55].

Поля, как и рубежи наблюдения из стационарных средств, представляют собой чаще всего системы наблюдения длительного действия, поэтому они должны быть рассчитаны для действия в разнообразной обстановке и сохранять свою эффективность в широком диапазоне изменения условий. Поэтому необходимо рассмотреть методы построения и расчета таких систем наблюдения при использовании их как в определенных, так и в неопределенных ситуациях.

Принципиально могут рассматриваться два характерных типа полей, построенных из неподвижных средств наблюдения: сплошные и прерывистые. Те и другие поля могут быть использованы для обнаружения целей и наблюдения за их действием в различных районах и зонах для освещения обстановки о воздушных, наземных, надводных и подводных целях.

5.3.1. Сплошные поля наблюдения

Вначале рассмотрим принципы построения и методы расчета сплошных полей наблюдения с использованием характеристик R для определенных и R_n для неопределенных ситуаций. Здесь можно выделить четыре характерных способа взаимного расположения средств:

способ квадрата;

способ равностороннего треугольника;

способ прямоугольника;

способ равнобедренного треугольника.

При размещении средств по углам квадрата (рис. 5.6, а) обеспечивается равномерное по ширине и длине расположение средств; при этом каждому из средств отводится позиция

$$S_n^{(1)} = b^2 = d^2 = 2R^2. \quad (5.32)$$

Очевидно, что

$$d = \sqrt{2} R. \quad (5.33)$$

Необходимое число средств для формирования поля размером $S_n = L_1 L_2$

$$N = \frac{S_n}{S_n^{(1)}} = \frac{L_1 L_2}{2R^2}. \quad (5.34)$$

При размещении средств по углам равностороннего треугольника (рис. 5.6, б) также обеспечивается равномерное распределение средств по площади поля.

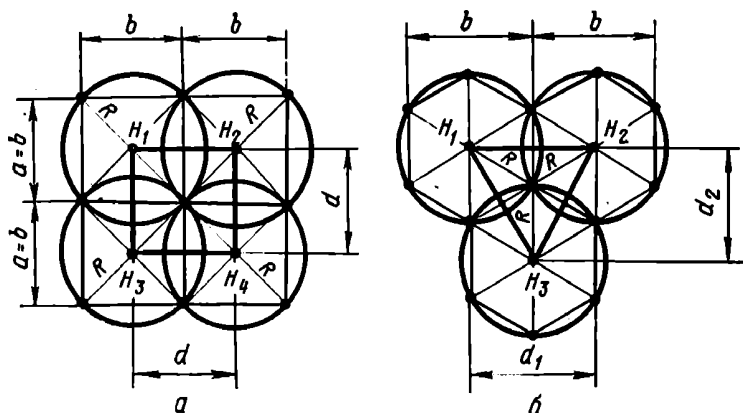


Рис. 5.6. Взаимное расположение средств при построении сплошного поля наблюдения:

a — способ квадрата; *б* — способ равностороннего треугольника

В отличие от первого способа расстояние d_1 между наблюдателями по фронту будет отличаться от расстояния d_2 по глубине.

Здесь

$$d_1 = \sqrt{3} R;$$

$$d_2 = \frac{3}{2} R.$$

Необходимое количество средств для формирования поля

$$N = N_1 N_2,$$

где $N_1 = \frac{L_1}{d_1}$, $N_2 = \frac{L_2}{d_2}$ — необходимое количество средств соответственно по фронту и глубине поля.

Окончательно

$$N = \frac{2L_1 L_2}{3\sqrt{3}R^2}. \quad (5.35)$$

Нетрудно заметить, что при данном способе размещения размер позиции одного наблюдателя (площадь вписанного в круг радиуса R шестиугольника)

$$S_n^{(1)} = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2. \quad (5.36)$$

Использование способа равностороннего треугольника дает экономию средств наблюдения порядка 30% по сравнению со способом квадрата, так как при этом способе площадь позиции одного наблюдателя в 1,3 раза больше

$$\frac{d_1 d_2}{d^2} = \frac{3\sqrt{3}}{4} \approx 1,3. \quad (5.37)$$

Это достигается за счет уменьшения количества областей перекрытия с четырех до трех. Аналогично можно рассчитать сплошные поля при размещении средств способами прямоугольника и равнобедренного треугольника.

5.3.2. Прерывистые поля наблюдения

При недостатке средств и необходимости охвата наблюдением больших пространств могут быть использованы прерывистые поля наблюдения, состоящие из отдельных линий наблюдения (рис. 5.7) или отдельных средств наблюдения (рис. 5.8).

Прерывистые поля наблюдения в ряде случаев позволяют с достаточной эффективностью осуществлять не только обнаружение, но и слежение за целью, определение ее местоположения и элементов движения. Для решения указанных задач в подобных системах наблюдения могут использоваться активные (определяющие азимут и дистанцию цели) и пассивные (определяющие только направление на излучающий объект) средства. Иногда такие системы могут решать некоторые из указанных задач и при использовании простейших средств обнаружения, например позволяющих лишь фиксировать факт присутствия цели в зоне своего действия. Например, по местоположению и размеру зон действия таких средств (рис. 5.8, б) можно ориентировочно судить о курсе цели (заключен в угле между касательными) и ее скорости (по времени прохождения цели от одного средства к другому, от одной линии к другой).

При расчете поля наблюдения, состоящего из нескольких линий, образованных симметрично и линейно расположенными на них средствами обнаружения (рис. 5.7, а), величина интервала между средствами d_1 может быть определена по изложенной ранее методике (см. разд. 5.1), а

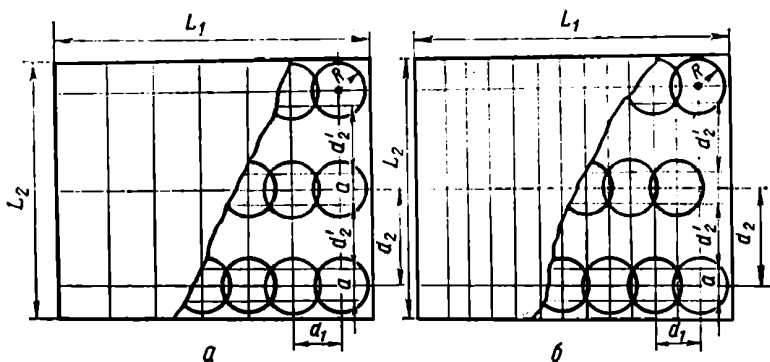


Рис. 5.7. Прерывистые по глубине поля наблюдения при линейном а и шахматном б расположении средств

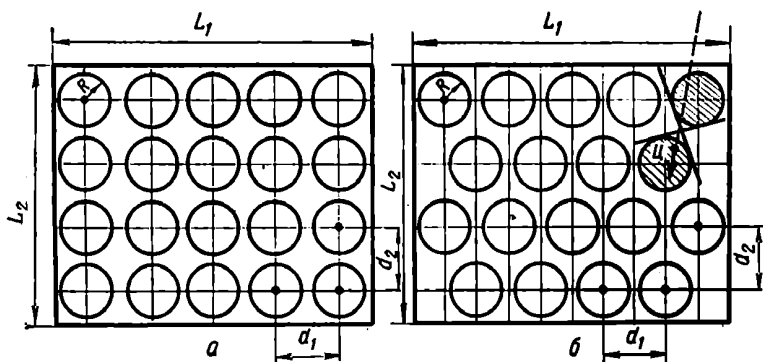


Рис. 5.8. Прерывистые по фронту и глубине поля наблюдения при линейном а и шахматном б расположении средств

величина d_2 определяется из оперативно-тактических соображений (например, из необходимого времени между двумя засечками цели, между моментами прохождения ею первой и второй линий или из времени, необходимого на выдачу целеуказания, наведения и др.).

Требуемое количество линий для создания прерывистого по глубине поля наблюдения

$$N_{\lambda} = \frac{L_1}{a + d_2'} = \frac{L_1}{d_2}, \quad (5.38)$$

а количество постов в линии

$$N_{\pi} = \frac{L_1}{d_1}. \quad (5.39)$$

Общее количество постов для формирования поля

$$N = N_{\lambda} N_{\pi} = \frac{L_1 L_2}{d_1 d_2}. \quad (5.40)$$

Для расчета прерывистых по фронту и глубине полей из стационарных пассивных средств (рис. 5.8) величины d_1 и d_2 могут быть определены из соображений дву-, трех- и более кратного обнаружения цели за время ее прохождения через поле наблюдения. Нетрудно заметить, что при $d_1 = d_2 = 2R$ обеспечивается четырехкратное установление контакта с целью, т. е. попадание цели в зоны действия четырех средств (постов) при перпендикулярном фронту движении. Если $d_1 = d_2 = 4R$, то при линейном расположении средств участки длиной $2R$, на которых будет четырехкратное обнаружение цели, идущей курсом, перпендикулярным L_1 , будут чередоваться с участками длиной $2R$, на которых не будет контактов с целью, а при шахматном расположении средств при указанных курсах цель будет обнаружена дважды. Изменение курса цели от перпендикулярного к фронту (рис. 5.8, б) будет приводить к увеличению числа контактов.

Считается, что шахматное расположение обеспечивает более равномерное распределение средств и возможных контактов с целью по площади поля и поэтому является предпочтительным для прерывистых полей наблюдения.

5.3.3. Эффективное поле наблюдения

Так называемое эффективное поле наблюдения обеспечивает достаточно надежное наблюдение за контролируемым районом при относительно малом расходе средств. Понятие эффективного поля наблюдения вводится по аналогии с рассмотренными ранее эффективными линиями наблюдения. Принцип его построения и расчета основан на определении некоторого минимума средств, обеспечивающего достаточно эффективное наблюдение за районом длительно действующей системы, за время действия кото-

рой возможны сильные изменения условий наблюдения и обусловленное этим изменение эффективности ее средств. Такое поле легко может быть построено и рассчитано с использованием характеристики L_z (см. разд. 3.3).

Аналогично могут быть рассмотрены и некоторые методы построения и расчета простейших полей наблюдения из одного или нескольких подвижных средств [2, 12, 18, 45, 49, 59, 61].

5.4. ПОЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ИЗ ПОДВИЖНЫХ СРЕДСТВ

Для иллюстрации общих принципов из всего разнообразия систем наблюдения с использованием подвижных средств целесообразно рассмотреть основы построения и расчета систем разового обследования и систем последовательного обследования. В первых из них (за счет использования либо очень мощных средств наблюдения, либо больших нарядов сил поиска и обнаружения) охват наблюдением контролируемого района и освещение обстановки о целях в нем с заданной тщательностью достигается в каждом цикле наблюдения и освещения осмотром всего района за один пролет (галс обследования) [45]. В системах последовательного обследования полный охват наблюдением и освещением обстановки всего района достигается лишь за счет выполнения нескольких пролетов (галсов обследования) [2, 51, 61].

5.4.1. Эффективное освещение обстановки о целях в районе

Применение систем последовательного обследования характерно для наблюдения и освещения обстановки в обширных районах, когда не хватает средств для разового обследования всего заданного района. В этом случае задача решается способом последовательных обследований отдельных участков заданного района на основе соответствующего маневрирования одиночного или группы наблюдателей. Здесь интересно рассмотреть два характерных случая (рис. 5.9):

- цель движется неопределенным курсом;
- цель движется определенным курсом.

Для расчета систем эффективного освещения в том и в другом случае может быть применен метод, основанный на использовании характеристики $S_{\text{осп}}$. Суть метода состо-

ит в нарезке для каждого пролета (галса обследования)
полосы осмотра

$$S_{\text{обс}}^{(1)} = S_{\text{осв}}.$$

Величина $S_{\text{осв}}$ в первом случае определяется из рис. 5.10
(заштрихована)

$$S_{\text{осв}} = R_0 \sqrt{l_r^2 - R_0^2} + R_0^2 \frac{\pi + 2q_k}{2}, \quad (5.41)$$

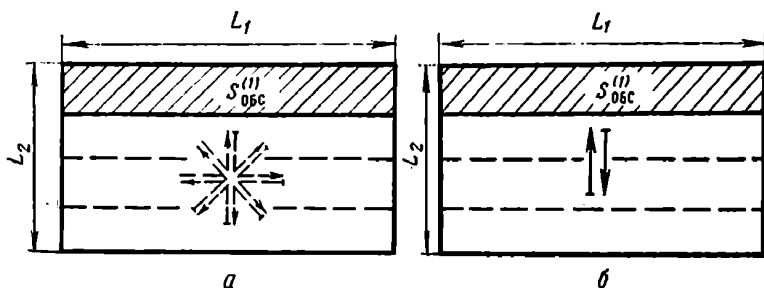


Рис. 5.9. Поле наблюдения при неопределенном а и определенном б
направлении движения цели

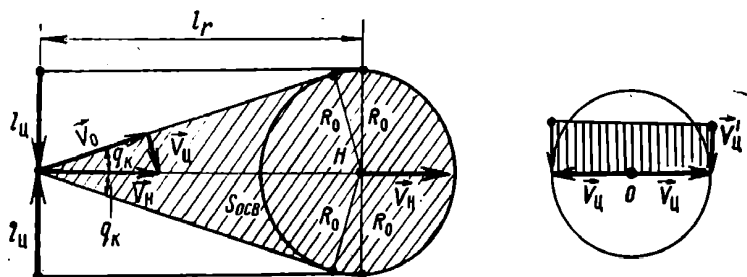


Рис. 5.10. Область освещения $S_{\text{осв}}$ при контрольном поиске в районе
где

$$l_r = V_{\text{н}} t'_r, \quad (5.42)$$

$$t'_r = \frac{l_{\text{ц}}}{V'_{\text{ц}}} = \frac{R_0}{V'_{\text{ц}}}, \quad (5.43)$$

$$V'_{\text{ц}} = \frac{\pi}{4} V_{\text{ц}}. \quad (5.44)$$

В случае определенного курса цели, перпендикулярного
линиям патрулирования (галсирования) наблюдателя, и
при возможном двухстороннем проникновении цели (туда

и обратно) величина l'_r определяется на основе использования в формуле (5.43) величины V_{Π} вместо V'_Π .

В неопределенных физических условиях для определения $S_{\text{осв}}$ необходимо использовать характеристику R_a вместо $R=R_0$.

Кроме того, для определения $S_{\text{осв}}$ в подобных случаях можно использовать характеристики W и L_a , с помощью которых в случае двухстороннего проникновения цели (це-

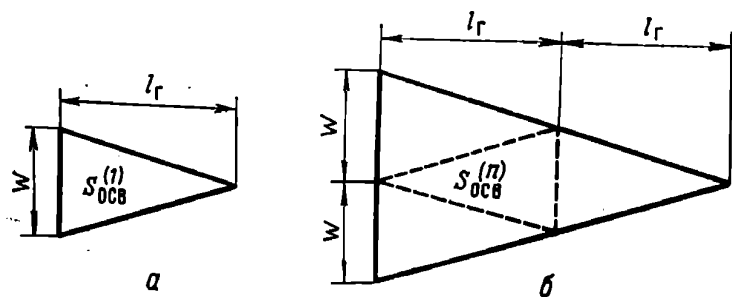


Рис. 5.11. Определение $S_{\text{осв}}$ с использованием характеристики W для одиночного а и группы б наблюдателей

лей) определенным курсом (рис. 5.9, б) величина $S_{\text{осв}}^{(1)}$ для одного и $S_{\text{осв}}^{(n)}$ для группы наблюдателей определяется весьма просто (рис. 5.11 и 5.12). Так как

$$\frac{2l_r}{W} = \frac{V_{\Pi}}{V_{\Pi}} = m_{\Pi}, \quad l_r = \frac{m_{\Pi} W}{2},$$

то

$$S_{\text{осв}}^{(1)} = \frac{W l_r}{2} = \frac{m_{\Pi}}{4} W^2, \quad (5.45)$$

$$S_{\text{осв}}^{(n)} = n^2 S_{\text{осв}}^{(1)} = \frac{n^2 m_{\Pi}}{4} W^2. \quad (5.46)$$

Или, так как

$$\frac{2l'_r}{L_a} = \frac{V_{\Pi}}{V_{\Pi}} = m_{\Pi}, \quad l'_r = \frac{m_{\Pi}}{2} L_a,$$

то

$$S_{\text{осв}}^{(1)} = L_a^2 + \frac{m_{\Pi}}{4} L_a^2 = \left(1 + \frac{m_{\Pi}}{4}\right) L_a^2, \quad (5.47)$$

$$S_{\text{осв}}^{(n)} = n L_a^2 + n^2 \frac{m_{\Pi}}{4} L_a^2 = n \left(1 + n \frac{m_{\Pi}}{4}\right) L_a^2. \quad (5.48)$$

Для ситуаций одностороннего проникновения цели полученный результат удваивается. При неопределенном курсе цели (рис. 5.9, а) в полученные формулы (5.45) — (5.48) вместо m_{Π} подставляют величину m'_{Π} , определяемую из условия

$$V'_{\Pi} = \frac{\pi}{4} V_{\Pi}.$$

Зная величины $S_{\text{осв}}^{(1)}$ и $S_{\text{осв}}^{(n)}$, можно легко рассчитать рассматриваемую систему наблюдения, в частности определить число пролетов (галсов) N_{Γ} , необходимое для охвата

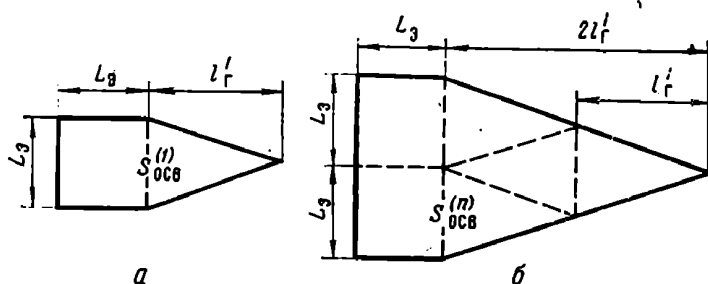


Рис. 5.12. Определение $S_{\text{осв}}$ с использованием характеристики L_3 для одиночного а и группы б наблюдателей

наблюдением и освещения обстановки контролируемого района площадью $S_p = L_1 L_2$ при использовании одного или группы из n наблюдателей:

$$N_{\Gamma}^{(1)} = \frac{S_p}{S_{\text{осв}}^{(1)}} \quad (5.49)$$

и

$$N_{\Gamma}^{(n)} = \frac{S_p}{S_{\text{осв}}^{(n)}}. \quad (5.50)$$

Полученные выражения свидетельствуют о резко возрастающей эффективности группового обследования района. Однако следует заметить, что наибольшую эффективность обеспечивает быстрое и всеохватывающее разовое обследование — осмотр всего района за один галс.

Число одиночных наблюдателей $N_{\Pi}^{(1)}$ или тактических групп из n наблюдателей $N_{\Pi}^{(n)}$, необходимое для организа-

ции общей группы разового обследования района, может быть определено по формулам:

$$N_{\Pi}^{(1)} = \frac{S_p}{S_{\text{осв}}^{(1)}}, \quad (5.51)$$

$$N_{\Pi}^{(n)} = \frac{S_p}{S_{\text{осв}}^{(n)}}. \quad (5.52)$$

5.4.2. Обнаружение цели с заданной вероятностью

При рассмотрении основных принципов построения систем наблюдения последовательного и разового обследования считалось, что рассматриваемые системы обеспечивают достоверное обнаружение целей. Практически эти системы обеспечивают обнаружение с вероятностью, зависящей от качества поиска и физических условий [2, 3, 12, 18, 25, 32, 39, 49, 50, 59, 61].

Определим необходимое время обследования $t_{\text{он}}$ района S_p заданным количеством наблюдателей $N_{\Pi 3}$ для обеспечения обнаружения цели с заданной вероятностью P_3 для схем идеального закономерного поиска (ИЗП) и чисто случайного поиска (ЧСП).

Для неопределенных физических условий, когда $2R_3 = W$ (см. гл. 4), при ИЗП

$$P_3 = \bar{P}_{\text{утк}} = \frac{N_{\Pi 3} W \bar{V}_0 t_{\text{он}}}{S_p} = \frac{S_{\text{осв}}}{S_p} \quad (\text{при } S_{\text{осв}} \leq S_p). \quad (5.53)$$

Условие $S_{\text{осв}} \leq S_p$ характеризует прекращение обследования при обнаружении цели или при завершении осмотра всего района.

Из выражения (5.53) получим

$$t_{\text{он}} = \bar{t}_{\text{он}} = \frac{S_p P_3}{N_{\Pi 3} W \bar{V}_0}. \quad (5.54)$$

Величина $t_{\text{он}} = \bar{t}_{\text{он}}$ будет характеризовать в рассматриваемых неопределенных условиях среднее ожидаемое время поиска цели до обнаружения с заданной вероятностью.

Аналогично для ЧСП

$$P_3 = \bar{P}_{\text{утк}} = 1 - \exp\left(-\frac{S_{\text{осв}}}{S_p}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{N_{\Pi 3} W \bar{V}_0 t_{\text{он}}}{S_p}\right). \quad (5.55)$$

$$t_{\text{он}} = \bar{t}_{\text{он}} = -\frac{S_p \ln(1 - P_3)}{N_{\Pi 3} W \bar{V}_0} = \frac{S_p}{N_{\Pi 3} W \bar{V}_0} \ln\left(\frac{1}{1 - P_3}\right). \quad (5.56)$$

Формулы (5.53) и (5.55) характеризуют ожидаемую вероятность обнаружения цели при наличии одной цели в

районе или вероятность обнаружения всех находящихся в районе целей. Если же при $N_d > 1$ в определяющее $S_{обс}$ выражение вводится множитель N_d , то эти формулы будут характеризовать вероятность обнаружения хотя бы одной из всех N_d целей. Формулы (5.54) и (5.56) будут характеризовать необходимое среднее время поиска соответственно одной или всех N_d целей в районе. Среднее время обнаружения хотя бы одной цели из N_d одинаковых целей определяется при условии, что в выражения для $S_{обс}$ введена величина N_d .

При анализе ситуаций поиска и обнаружения целей в районе полученные для ИЗП и ЧСП значения $t_{он}$ могут быть соответственно использованы как оценки требуемого минимального и максимального времени обследования района в зависимости от качества поиска. Для реального поиска в зависимости от способа и качества его выполнения также могут быть выбраны соответствующие оценки величины $t_{он}$, более близкие к ИЗП или ЧСП. Так могут определяться характеристики необходимого времени обследования для различных по качеству видов поиска.

Необходимое количество наблюдателей $N_{ин}$ для заданной вероятности обнаружения цели P_3 и заданного времени обследования $t_{о3}$ можно также определить из формул $P_3 = P_{утк}$ для ИЗП и ЧСП.

$$N_{ин} = \frac{S_p P_3}{t_{о3} W \bar{V}_0} \quad (5.57)$$

$$N_{ин} = - \frac{S_p \ln(1 - P_3)}{t_{о3} W \bar{V}_0} = \frac{S_p}{t_{о3} W \bar{V}_0} \ln \left(\frac{1}{1 - P_3} \right) \quad (5.58)$$

Для определенных физических условий в полученных для $t_{он}$ и $N_{ин}$ выражениях вместо W используется величина $2R = 2R_d$, а при определенном курсе цели вместо $\bar{V}_0$ нужно взять $V_{о.}$

В ситуациях, когда $V_n > 0$, $V_n = 0$ или $V_n \gg V_d$, т. е. во всех случаях, когда наиболее выгодно использование систем наблюдения из подвижных средств поиска, вместо $\bar{V}_0$ может быть использована величина V_n . Все это значительно упрощает расчеты.

5.4.3. Периодичность обследования

При построении и расчете систем наблюдения, призванных освещать обстановку в районе, необходимо учитывать такую характеристику, как периодичность обследования (освещения) $t_{по.}$

С одной стороны, чтобы не допустить старения данных обстановки, должно быть

$$t_{\text{по}} \leq t_{\text{сд}} - t_{\text{об}} - t_{\text{дл}}, \quad (5.59)$$

где $t_{\text{сд}}$ — допустимое время старения данных обстановки;
 $t_{\text{об}}$ — время осмотра района за один цикл обследования;

$t_{\text{дл}}$ — время доставки данных обстановки.

С другой стороны, для исключения незаметного прохода цели должно быть

$$t_{\text{по}} = t_{\text{об}} + t_{\text{пн}} \leq t_{\text{уц}}, \quad (5.60)$$

где $t_{\text{пн}}$ — время паузы между наблюдениями;

$t_{\text{уц}}$ — время проникновения цели.

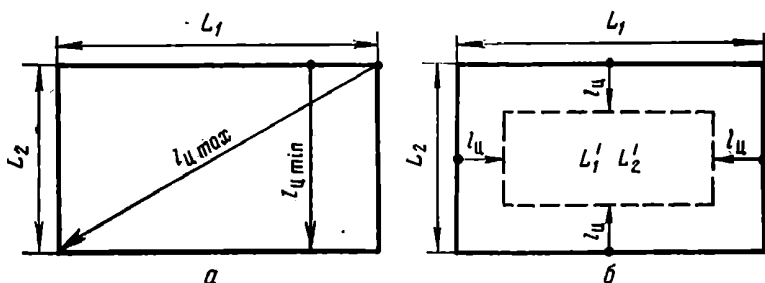


Рис. 5.13. Схемы проникновения цели:

а — через поле наблюдения; б — на боевую позицию

При этом могут быть два характерных случая. Проникновение цели через поле наблюдения (рис. 5.13, а) может быть охарактеризовано минимальным временем прохода цели по траектории $l_{\text{уц min}}$:

$$t_{\text{пн}} = \frac{l_{\text{уц min}}}{V_{\text{ц}}} = \frac{L_2}{V_{\text{ц}}}. \quad (5.61)$$

а проникновение цели на боевую позицию (рис. 5.13, б) — временем движения цели по траектории $l_{\text{уц}}$:

$$t_{\text{уц}} = \frac{l_{\text{уц}}}{V_{\text{ц}}} = \frac{L_1 - L'_1}{2V_{\text{ц}}} = \frac{L_2 - L'_2}{2V_{\text{ц}}}. \quad (5.62)$$

Величина $l_{\text{уц min}}$ определяет минимально необходимую глубину поля наблюдения, а величины L_1 и L_2 характеризуют минимально необходимый размер контролируемого района для обеспечения обнаружения и своевременной засечки цели на траектории ее проникновения в зону $L'_1 L'_2$.

5.5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Способность системы наблюдения обнаруживать цели можно характеризовать полем мгновенной плотности вероятности и полем накопленной вероятности обнаружения [3, 9].

Каждой точке плоскости соответствует вполне определенная величина мгновенной плотности вероятности и накопленной вероятности обнаружения. Для системы наблюдения из неподвижных средств можно построить статическое поле, которое на чертежах изобразится линиями равных мгновенных плотностей вероятностей обнаружения или линиями равных накопленных вероятностей обнаружения.

В данной методике для примера рассматривается ситуация, когда распределение дальности действия средств наблюдения, образующих рубеж, подчиняется нормальному (н.з) или усеченному нормальному (у.н.з) распределению, для которых

$$\Psi(R)_{н.з} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(R-m)^2}{2\sigma^2}}; \quad (5.63)$$

$$\Psi(R)_{у.н.з} = \frac{\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(R-m)^2}{2\sigma^2}}}{\frac{1}{2} \left[1 + \Phi\left(\frac{m}{\sigma \sqrt{2}}\right) \right]}; \quad (5.64)$$

$$P(R)_{н.з} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(R-m)^2}{2\sigma^2}} dR = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi\left(\frac{R-m}{\sigma \sqrt{2}}\right) \right]; \quad (5.65)$$

$$P(R)_{у.н.з} = \frac{1 - \Phi\left(\frac{R-m}{\sigma \sqrt{2}}\right)}{1 + \Phi\left(\frac{m}{\sigma \sqrt{2}}\right)}. \quad (5.66)$$

Для упрощения в выражениях (5.63) — (5.66) обозначены $m = m_R$ и $\sigma = \sigma_R$, а Φ — функция Лапласа [13].

Для известных законов распределения дальности действия средств наблюдения оценка ожидаемой вероятности установления приборного контакта сводится (см. разд. 3.1) к определению накапливающейся вероятности обнаружения $P(t)$ на основе функции $\gamma = \gamma(t)$, рассчитываемой с учетом характеристик этих законов и характера движения цели [3]:

$$P(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t \gamma(t) dt \right]. \quad (5.67)$$

В разд. 3.1 показано, что при прочих равных условиях способность прибора наблюдения обнаруживать цель различна для различных точек зоны его действия; она обычно растет с сокращением расстояния до цели и уменьшается с его увеличением, т. е. существует зависимость

$$\gamma = \gamma(R),$$

на основе которой для известного характера движения цели можно определить закон установления приборного контакта в функции от t , т. е. $\gamma = \gamma(t)$.

Использование функции $\gamma(t)$ для количественной характеристики эффективности средств наблюдения обусловлено возможностью определения на практике статистических распределений дальности обнаружения целей и выявления на их основе зависимости $\gamma(R)$ для всех видов типических условий наблюдения

$$\gamma(R) = \frac{\psi(R)}{1 - P(R)} \bar{\omega}, \quad (5.68)$$

где $\psi(R)$ — функция плотности вероятности, в данном случае характеризующая дифференциальный закон распределения дальности действия;

$1 - P(R) = Q(R)$ — функция распределения, характеризующая интегральный закон распределения дальности необнаружения;

$P(R)$ — функция распределения, характеризующая интегральный закон распределения дальности обнаружения;

$\bar{\omega}$ — средняя скорость движения цели, для которой была получена статистика, определяющая закон распределения дальности.

Для нормального и усеченного нормального законов распределения дальности действия средств наблюдения

$$\gamma(R)_{н.з} = \frac{\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(R-m)^2}{2\sigma^2} \right]}{\frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{R-m}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right]} \bar{\omega}; \quad (5.69)$$

$$\gamma(R)_{у.н.з} = \frac{\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(R-m)^2}{2\sigma^2} \right]}{\frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{m}{\sigma \sqrt{2}} \right) + \Phi \left(\frac{R-m}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right]} \bar{\omega}. \quad (5.70)$$

Функцию $\gamma(t)$ можно получить, если в выражение для $\gamma(R)$ подставить закон изменения расстояния R во времени

при движении цели относительно наблюдателя. Наиболее характерным является случай, когда цель движется с постоянной скоростью, имея курсовой параметр Π , отличный от нуля (рис. 5.14). В этом случае скорость изменения расстояния между целью и наблюдателем в течение времени наблюдения не остается постоянной.

Пусть цель, вначале находившаяся в точке $\mathcal{C}_1$ на расстоянии R_1 от прибора наблюдения, перемещается со скоростью $V_{\mathcal{C}}$, имея курсовой параметр Π . При этом переме-

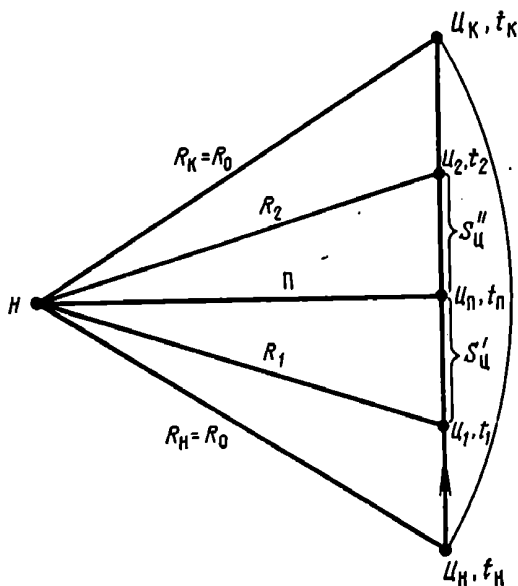


Рис. 5.14. Схема прохождения цели через зону обнаружения

щение цели от точки $\mathcal{C}_1$ до точки $\mathcal{C}_n$ происходит в течение времени

$$t' = t_n - t_1 = \frac{\sqrt{R_1^2 - \Pi^2}}{V_{\mathcal{C}}} \quad (5.71)$$

Уравнение движения цели будет

$$R^2 = \Pi^2 + V_{\mathcal{C}}^2 (t_n - t)^2 \quad (5.72)$$

или

$$R = \sqrt{\Pi^2 + V_{\mathcal{C}}^2 (t_n - t)^2} \quad (5.73)$$

Отсчет времени будем вести от момента t_n — вхождения цели в зону обнаружения в точке C_n и заканчивать моментом $t_k = 2t_n$ — выхода из зоны обнаружения. Если подставим в выражения (5.69) и (5.70) вместо R закон изменения расстояния (5.73), то получим выражения для определения $\gamma(t)_{н.з}$ и $\gamma(t)_{у.н.з}$, после подстановки которых в формулу (5.67) получим выражения для $P(t)_{н.з}$ и $P(t)_{у.н.з}$.

Так мы получим соотношения для одного средства наблюдения. Однако рассматриваемый нами рубеж построен таким образом, что обнаружение может произойти двумя или более приборами наблюдения. В этом случае подобную систему наблюдения с вероятностной точки зрения можно охарактеризовать полем накапливающейся вероятности обнаружения или интегральной кривой распределения по длине рубежа суммарной вероятности обнаружения $P_n(t)$.

Каждый прибор наблюдения работает независимо от другого. Независимость работы понимается в том смысле, что обнаружение цели, вошедшей в район действия одного прибора наблюдения, не оказывает влияния на вероятность обнаружения этой цели другим прибором.

Решение об обнаружении принимается в том случае, если сигнал поступил хотя бы от одного прибора наблюдения. Поэтому естественно говорить о накапливающейся вероятности обнаружения хотя бы одной станцией из n участвующих

$$P_n(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)], \quad (5.74)$$

где n — число станций (приборов), участвующих в обнаружении цели;

$P_i(t)$ — накапливающаяся вероятность обнаружения цели i -й станцией.

Подставив в выражение (5.74) выражение для определения $P(t)_{н.з}$ или $P(t)_{у.н.з}$, получим выражение для определения суммарной накапливающейся вероятности обнаружения цели.

Предложенная методика принципиально дает возможность оценить ожидаемую вероятность обнаружения цели для любого отдельного прохождения цели, при любых курсах ее движения. Однако нас особо интересует возможность определения некоторой обобщенной (интегральной) характеристики эффективности обнаружения цели при проходе ею рубежа по кратчайшему расстоянию, т. е. для

ситуации движения цели курсами, перпендикулярными линии рубежа.

В самом деле, располагая курсы движения цели перпендикулярно линии рубежа с определенным шагом Δx (рис. 5.15), можно в данном случае определить накопленную вероятность обнаружения цели, движущейся с определенной скоростью, для любой точки проникновения ее через линию рубежа $P_n^{(1)}, P_n^{(2)}, \dots, P_n^{(m)}$. Соединив плавной кривой точки $P_n^{(1)}, P_n^{(2)}, \dots, P_n^{(m)}$, получим распределение суммарной вероятности обнаружения цели по длине рубе-

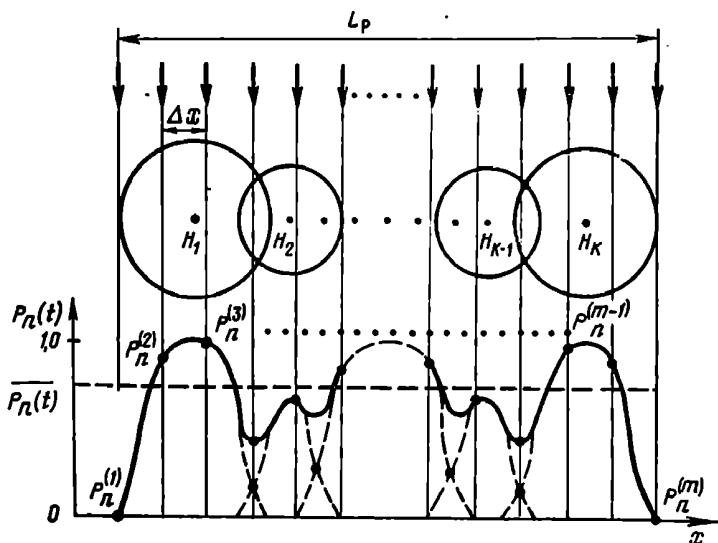


Рис. 5.15. Распределение вероятности обнаружения цели на рубеже

жа, которое и может рассматриваться в качестве первой обобщенной характеристики эффективности обнаружения цели, прорывающей рубеж наблюдения.

Полученная таким образом кривая распределения суммарной вероятности обнаружения цели по линии рубежа может быть использована для характеристики ожидаемой вероятности обнаружения данного типа цели на рассматриваемом рубеже применительно к нормальному или усеченному нормальному закону распределения дальности действия приборов наблюдения для случая движения цели перпендикулярно линии рубежа и полного прохода целью рубежа обнаружения.

Данная методика позволяет рассчитать и построить еще более общую и универсальную характеристику эффектив-

ности обнаружения цели рубежом наблюдения, изображаемую в виде поля из серии эквипотенциальных кривых равных суммарных вероятностей обнаружения цели в зависимости от глубины ее проникновения в зону обнаружения рубежа наблюдения. Действительно, как уже отмечалось, накопленная вероятность обнаружения называется именно так потому, что изменение ее происходит с течением времени только в сторону увеличения (от 0 до 1). Ясно, что при движении цели в зоне действия приборов наблюдения каждому моменту времени будет соответствовать определенное значение ожидаемой вероятности обнаружения и при фиксированной скорости цели $V_{ц}$ определенное углубление цели в зону действия приборов наблюдения, составляющих рубеж, т. е., задавая различные моменты времени t и определяя для них конечную вероятность $P_n(t)$ и углубление $y = V_{ц}t$, можно построить поле интегральной накапливающейся вероятности обнаружения целей. Кроме того, на основе рассмотренной методики можно определять и такую обобщенную характеристику эффективности рубежа наблюдения, как среднее значение вероятности обнаружения цели на рубеже. Она может быть определена путем замены площади под кривой распределения (рис. 5.15) на площадь прямоугольника, одна сторона которого L_p , а другая $\overline{P_n(t)}$ — среднее значение суммарной вероятности обнаружения цели, проходящей сквозь рубеж наблюдения.

Точное аналитическое выражение для определения площади под кривой составить очень сложно. Практически эта площадь определяется приближенно подбором для различных ее участков эквивалентных геометрических фигур.

Данная методика может быть использована для построения полей вероятностей обнаружения целей с помощью одного или нескольких стационарных рубежей. Она может быть применена при расчете состава, построения, расположения этих рубежей, а также для оптимального использования данных рубежей в зависимости от тактической обстановки, физических условий наблюдения и других факторов. Оптимальный вариант построения и использования рубежа или системы рубежей может быть выбран после просчета достаточного количества вариантов по данной методике.

С незначительными изменениями указанная методика может быть применена и для расчета движущихся рубежей наблюдения, а также сплошных и прерывистых полей наблюдения, состоящих из нескольких рубежей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Введение в теорию выработки решений. М., Воениздат, 1972.
Авт.: В. А. Абчук, Л. А. Емельянов, Ф. А. Матвейчук, В. Г. Суздаль.
Разд.: Обоснование решений методами теории поиска.
2. Абчук В. А., Суздаль В. Г. Поиск объектов. М., «Сов. радио», 1977.
3. Афанасьев А. А., Горбунов В. А. Эффективность обнаружения целей радиотехническими средствами наблюдения. М., Воениздат, 1964.
4. Ашкерев В. П., Уваров М. А. Противовоздушная оборона. М., ДОСААФ, 1972.
5. Бокарев В. А. Кибернетика и военное дело. М., Воениздат, 1969.
6. Брагин В. К., Кубарев А. Г. Противоракетная оборона. М., Воениздат, 1966.
7. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М., «Наука», 1967.
8. Бубнов Г. П. Автоматизация в ПВО. М., Воениздат, 1963.
9. Буров Н. И. Маловысотная радиолокация. М., Воениздат, 1977.
10. Вакин С. А., Шустов Л. Н. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки. М., «Сов. радио», 1968.
11. Радиолокационные устройства (теория и принципы построения). Под ред. В. В. Григорина-Рябова. М., «Сов. радио», 1970. Авт.: В. В. Васин, О. В. Власов, В. В. Григорин-Рябов, П. И. Дудник, Б. М. Степанов.
Разд.: Дальность действия радиолокационных станций.
12. Вентцель Е. С. Введение в исследование операций. М., «Сов. радио», 1964.
Разд.: Оценка эффективности разведывательных действий и обработка разведывательных данных.
13. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969.
14. Верин П. Н., Морозов К. В. Ракетное оружие ПВО на море. М., Воениздат, 1964.
Разд.: Организация борьбы с воздушным и космическим противником.
15. Вишин Г. М. Многочастотная радиолокация. М., Воениздат, 1973.
16. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций. М., «Наука», 1965. Авт.: Б. Г. Володин, М. П. Ганин, И. Я. Динер, Л. Б. Комаров, А. А. Свешников, К. Б. Старобин.
17. Гаврилин Н. Использование космических средств наблюдения в ВМС США.— «Зарубежное военное обозрение», 1975, № 9.

18. Гаррет Р., Лондон Дж. Основы анализа операций на море. Перевод под ред. Б. Ф. Балева. М., Воениздат, 1974.
Разд.: Теория обнаружения.
19. Голев К. В. Расчет дальности действия радиолокационных станций. М., «Сов. радио», 1962.
20. Горбунов В. А. Методы оценки вероятности обнаружения цели в зоне действия прибора наблюдения.— «Морской сборник», 1962, № 11.
21. Горбунов В. А. Методика построения графиков распределения дальности действия средств наблюдения.— «Морской сборник», 1965, № 3.
22. Динер И. Я. Исследование операций. Л., ВМОЛУА, 1969.
Разд.: Эффективность поиска и слежения.
23. Теоретические основы радиолокации. Под ред. В. Е. Дулевича. М., «Сов. радио», 1964. Авт.: В. Е. Дулевич, А. А. Коростелев, Ю. А. Мельник, Н. И. Буренин, А. В. Петров, А. А. Веретягин, Н. Г. Бандурко.
Разд.: Дальность радиолокационного наблюдения.
24. Евгенов М. Космические средства наблюдения ВВС США.— «Зарубежное военное обозрение», 1976, № 4.
25. Теория поиска в военном деле. М., Воениздат, 1964. Авт.: Л. А. Емельянов, В. А. Абчук, В. П. Лапшин, В. Г. Суздаль.
26. Системы, приборы и устройства подводного поиска. Под общ. ред. Р. Ф. Жукова. М., Воениздат, 1972. Авт.: Р. Ф. Жуков, А. А. Кондратович, С. Д. Могильный, Б. И. Ципко.
Разд.: Основные положения теории обнаружения объектов.
27. Каценбоген М. С. Характеристики обнаружения. М., «Сов. радио», 1965.
28. Квитницкий А. А. Борьба с подводными лодками. М., Воениздат, 1963.
29. Ключевые проблемы ПЛО—обнаружение и классификация целей.— В кн.: Военно-морское оружие. М., Воениздат, 1965.
30. Конторов Д. С., Голубев-Новожилов Ю. С. Введение в радиолокационную системотехнику. М., «Сов. радио», 1971.
Разд.: Классификация радиолокационных систем. Структура радиолокационной системы.
31. Крысенко Г. Д. Современные системы ПВО. М., Воениздат, 1966.
32. Купман Б. О. Статьи по теории поиска.— «Operations Research», 1956, 1957.
33. Лапшин В. П. Кинематические основы теории поиска.— «Морской сборник», 1962, № 8.
34. Леонов А. И. Радиолокация в противоракетной обороне. М., Воениздат, 1967.
35. Львов Г. Оценка возможностей РЛС по раннему обнаружению целей.— «Вестник ПВО», 1975, № 12.
36. Мальгин А. С. Управление огнем зенитных ракетных комплексов. М., Воениздат, 1976.
Разд.: Информационное обеспечение процесса управления огнем зенитных ракетных комплексов.
37. Матвиенко В. Н., Тарасюк Ю. Ф. Дальность действия гидроакустических средств. Л., «Судостроение», 1976.
38. Мищенко Ю. А. Загоризонтная радиолокация. М., Воениздат, 1972.
39. Морз Ф. М., Кимбелл Д. Е. Методы исследования операций. М., «Сов. радио», 1956.

Разд.: Применение критерия эффективности. Оценка приборов обнаружения.

40. Морозов В. М. Борьба с воздушно-космическими целями. М., Воениздат, 1967.

41. Палий А. И. Радиоэлектронная борьба. М., Воениздат, 1974.

42. Пересада С. А., Филиппов А. И., Демидов Л. Н. Борьба с низколетящими средствами воздушного нападения. М., Воениздат, 1971.

43. Петров Я. И. Станции сверхдальнего радиолокационного обнаружения.— «Вестник ПВО», 1965, № 1.

44. Петухов-С. И., Степанов Л. И. Эффективность ракетных средств ПВО. М., Воениздат, 1976.

45. Пухов Э. Самолеты дальнего радиолокационного обнаружения США.— «Вестник ПВО», 1973, № 6.

46. Радиолокационная техника. Т. II. М., «Сов. радио», 1949.

47. Раков В. И. Эффективность судовых радиоэлектронных систем. Л., «Судостроение», 1974.

Разд.: Характеристики обнаружения средств наблюдения.

48. Сиротин П. А. Возможности обнаружения цели при поиске на линии наблюдения.— «Морской сборник», 1962, № 5.

49. Сиротин П. А. Основы авиационного поиска противника в море.— «Морской сборник», 1964, № 6.

50. Сиротин П. А. Количественная оценка поиска.— «Морской сборник», 1969, № 8.

51. Основы маневрирования кораблей. М., Воениздат, 1966. Авт.: М. И. Скворцов, И. В. Юхов, Б. И. Землянов, В. А. Абчук, О. А. Мрыкин.

Разд.: Поиск противника в море.

52. Смирнов И. А. Стохастическое моделирование при решении некоторых задач поиска.— «Морской сборник», 1963, № 12.

53. Суриков Б. Т. Ракетные средства борьбы с низколетящими целями. М., Воениздат, 1973.

Разд.: Обнаружение и опознавание низколетящих целей.

54. Уайли Ф. Радиолокация на море. М., И. Л., 1955.

55. Хорбенко И. Г. Ультразвук в военном деле. М., Воениздат, 1976.

Разд.: Стационарная гидроакустика.

56. Цветков А. Г. Принципы количественной оценки эффективности радиоэлектронных средств. М., «Сов. радио», 1971.

57. Чижев Б. СОСУС обнаруживает подводную лодку.— «Морской сборник», 1975, № 10.

58. Основы исследования операций в военной технике. Под общ. ред. Ю. В. Чуева. М., «Сов. радио», 1965. Авт.: Ю. В. Чуев, П. М. Мельников, С. И. Петухов, Г. Ф. Степанов, Я. Б. Шор.

Разд.: Дальность обнаружения цели и ее характеристики.

59. Чуев Ю. В. Исследование операций в военном деле. М., Воениздат, 1970.

Разд.: Моделирование процессов разведки. Задачи поиска.

60. Шибачев Н. Ф. Борьба с ракетами. М., Воениздат, 1965.

61. Шлезингер Р. Дж. Радиоэлектронная война. М., Воениздат, 1963.

Разд.: Радиотехническая разведка.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
Глава 1. Общие предпосылки. Критерии обнаружения целей	5
1.1. Основные понятия и определения	—
1.2. Общая характеристика и классификация систем наблюдения	8
1.3. Особенности построения совмещенных и несовмещенных систем наблюдения	10
1.4. Приборный и тактический способы поиска, основные показатели их эффективности	14
1.5. Критерии оценки возможности обнаружения цели. Некоторые вопросы общей методологии	19
Глава 2. Дальность действия средств наблюдения	24
2.1. Методы оценки ожидаемой дальности действия	—
2.2. Понятие о распределениях дальности действия прибора наблюдения	31
2.2.1. Неопределенность акта обнаружения цели прибором наблюдения. Случайный характер дальности установления приборного контакта	—
2.2.2. Распределение дальности действия	33
2.2.3. Типовые законы распределения дальности действия	37
2.2.4. Понятие о распределении дальности скрытия и дальности наблюдения удаляющейся цели	40
2.3. Методика вероятностно-статистического описания ожидаемой дальности действия	41
2.3.1. Учет неопределенности физических условий установления контакта	42
2.3.2. Типовые кривые распределения дальности действия	44
2.3.3. Вероятностная характеристика зоны действия прибора наблюдения в горизонтальной плоскости	46
2.3.4. Учет высоты (глубины) движения цели. Зона обнаружения в пространстве	48
Глава 3. Эффективность установления приборных контактов	52
3.1. Математическое описание процессов установления приборных контактов	—
3.1.1. Мгновенные вероятности обнаружения цели	53
3.1.2. Накапливающиеся вероятности обнаружения цели	56
3.1.3. Методы определения аналитических зависимостей для закона установления приборного контакта	59
3.2. Распределение дальности обнаружения цели, движущейся на курсовом параметре, отличном от нуля	64
3.2.1. Распределение боковой дальности обнаружения	—
3.2.2. Распределение истинной дальности обнаружения	68
3.3. Методы определения эффективных характеристик дальности действия (обнаружения)	72
3.3.1. Эффективная дальность обнаружения цели, движущейся на курсовом параметре, близком к нулю	73
3.3.2. Эффективный радиус действия и эффективная ячейка наблюдения	74
3.3.3. Эффективная ширина полосы поиска (обнаружения) цели, движущейся на курсовом параметре, отличном от нуля	77
3.3.4. Средняя дальность обнаружения цели, проходящей через зону действия прибора наблюдения	79
3.4. Методы оценки упреждения в обнаружении при взаимном и совместном наблюдении	80

	Стр.
3.4.1. Простейшие методы сравнительной оценки упреждения	—
3.4.2. Метод сравнения распределений дальности действия (обнаружения)	81
3.4.3. Метод сравнения накапливающихся вероятностей обнаружения	82
3.4.4. Эффективность обнаружения при совместном наблюдении	84
3.5. Величина упреждения в дальности обнаружения. Априорные и апостериорные вероятности упреждения	85
3.5.1. Оценка априорных вероятностей упреждения	—
3.5.2. Оценка апостериорных вероятностей упреждения	90
Глава 4. Эффективность установления тактических контактов	93
4.1. Вероятность встречи наблюдателя с целью, движущейся с известной скоростью, по неизвестным курсом при заданном начальном местоположении цели	—
4.2. Математическое ожидание числа контактов при известном и неизвестном направлениях движения цели	99
4.3. Законы распределения тактических контактов относительно курса наблюдателя	103
4.3.1. Поиск неподвижных целей и целей, движущихся определенным курсом	—
4.3.2. Поиск целей, движущихся неопределенным курсом	106
4.4. Некоторые задачи оценки возможных направлений подхода и курса цели	111
4.4.1. Методы оценки ожидаемой вероятности установления контакта с целью в заданном секторе курсовых углов наблюдателя	—
4.4.2. Методы оценки ожидаемого курса цели в зависимости от курсового угла контакта	116
4.5. Основные законы установления тактических контактов в зависимости от качества поиска	119
4.5.1. Общее понятие качества тактического поиска	—
4.5.2. Виды поиска в зависимости от его качества. Основные законы установления тактического контакта	122
Глава 5. Многоэлементные системы наблюдения. Принципы построения и расчета. Эффективность обнаружения целей в системе наблюдения	126
5.1. Линии наблюдения из неподвижных средств	—
5.1.1. Линии наблюдения заданной минимальной глубины	127
5.1.2. Эффективные линии наблюдения	128
5.2. Линии наблюдения из подвижных средств	130
5.2.1. Патрулирование наблюдателей на общей позиции	—
5.2.2. Патрулирование наблюдателей на раздельных позициях	134
5.3. Поля наблюдения из стационарных средств	138
5.3.1. Сплошные поля наблюдения	—
5.3.2. Прерывистые поля наблюдения	140
5.3.3. Эффективное поле наблюдения	142
5.4. Поля наблюдения из подвижных средств	143
5.4.1. Эффективное освещение обстановки о целях в районе	—
5.4.2. Обнаружение цели с заданной вероятностью	147
5.4.3. Периодичность обследования	148
5.5. Эффективность обнаружения целей в системе наблюдения	150
Литература	156